

引用格式: 赵瑞, 陈颖. 广东省海上风电平价阶段经济性分析 [J]. 南方能源建设, 2025, 12(5): 100-107. ZHAO Rui, CHEN Ying. Economic analysis of offshore wind power in grid parity stage in Guangdong Province [J]. Southern energy construction, 2025, 12(5): 100-107. DOI: 10.16516/j.ceec.2025-236.

广东省海上风电平价阶段经济性分析

赵瑞[✉], 陈颖

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663)

摘要: [目的]海上风电是未来实现碳达峰、碳中和的重要途径之一, 具有良好的发展前景。随着海上风电快速发展, 产业链不断成熟, 投资水平逐渐降低, 上网电价补贴力度逐渐减小。自 2021 年起, 海上风电进入平价上网阶段。以广东省为例, 海上风电工程上网电价较以前降低 50%, 给项目投资开发带来较大压力。因此, 平价阶段项目经济效益分析对开发商投资决策尤为重要。[方法]为分析广东省海上风电平价阶段的经济效益, 文章以广东省某 1 000 MW 海上风电项目为例, 通过对项目投资各部分费用占比进行分析, 分别讨论了风机设备价格、贷款利率、单位投资和年等效利用小时数、广东省补贴政策等主要因素对项目收益率的影响。[结果]结果表明: (1) 风机设备价格在项目总投资中占比较大, 单机容量增大及价格降低良好地改善项目经济性; (2) 贷款利率呈下行趋势有利于资本金财务内部收益率增加; (3) 资本金财务内部收益率随年等效利用小时数增加而增加, 随单位投资增加而降低。当年等效利用小时数低于 3 000 h 时, 在平价上网条件下, 静态投资不超过 1.4 万元/kW 项目有一定的经济性。[结论]研究成果可为广东省未来海上风电项目建设提供参考。

关键词: 广东省; 海上风电; 平价阶段; 项目投资; 经济性分析

DOI: 10.16516/j.ceec.2025-236

文章编号: 2095-8676(2025)05-0100-08

CSTR: 32391.14.j.ceec.2025-236

中图分类号: TK89; TM614



论文二维码

Economic Analysis of Offshore Wind Power in Grid Parity Stage in Guangdong Province

ZHAO Rui[✉], CHEN Ying

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] Offshore wind power is one of the important ways to achieve carbon peaking and carbon neutrality in the future, and has a good development prospect. With the rapid development of offshore wind power, the industrial chain is constantly maturing, and the investment level is gradually reducing. Therefore, the subsidy for grid purchase price is gradually decreasing, and the industry has entered the stage of grid parity since 2021. Taking Guangdong Province as an example, the grid purchase price of offshore wind power projects has decreased by 50% compared with the previous, which has brought great pressure to the investment and development of wind power projects, making economic benefit analysis of projects in the parity stage particularly important for developers' decision-making in investment. [Method] In order to analyze the economic benefits of offshore wind power projects in the grid parity stage in Guangdong Province, this paper took a 1000 MW offshore wind power project in Guangdong Province as an example. First analyzed the proportions of major costs in the project investment, and then studied the influence of the price of wind turbine equipment, loan interest rate, unit investment and annual equivalent utilization hours, subsidy policies of Guangdong Province on the project rate of return. [Result] The results show that: (1) the price of wind turbine equipment accounts for a relatively large proportion in the total project investment, so

收稿日期: 2025-08-18 修回日期: 2025-08-22

基金项目: 中国能建广东院科技项目“广东省海上风电产业集群发展专题研究”(EV05441W); 中国能建广东院科技项目“分布式海上风电场柔性直流输电关键设备的研制”(ER10451W)

increasing unit capacity and reducing price can effectively improve the project's economic efficiency. (2) The downward trend of loan interest rate is conducive to an increase in the capital financial internal rate of return (FIRR). (3) The capital FIRR increases with the increase of annual equivalent utilization hours and decreases with the increase of unit investment. When annual equivalent utilization hours are less than 3 000 h, the project with a static investment of no more than 14 000 yuan/kW has certain economic benefits under the condition of grid parity. [Conclusion] The research results can provide reference for the construction of offshore wind power projects in Guangdong Province in the future.

Key words: Guangdong Province; offshore wind power; grid parity stage; project investment; economic analysis

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

一直以来,环境问题都受到人们的极大关注,当前全球变暖趋势愈演愈烈,控制碳排放是长期努力的目标。2020年9月,习近平总书记在联合国大会上提出:中国力争于2030年前实现碳达峰,努力争取2060年前实现碳中和。碳达峰、碳中和目标的提出将推动我国清洁能源新一轮布局与发展。我国拥有1.8万km海岸线,风能资源丰富,大力发展海上风电将成为实现这一目标的重要途径之一。

我国海上风电起步较晚,自2005年成立首个海上风电试点项目东海大桥项目以来,经过十几年发展已取得较大进步^[1-4]。随着项目经验积累及关键技术突破,海上风电投资不断下降^[5],已经从东海大桥的2.37万元/kW下降至1.5万元/kW~1.8万元/kW,且风电场场址水深及离岸距离也不断向更深更远发展。整体而言,相对于起步较早的欧洲国家来说,海上风电项目单位投资依然处于高位。目前,国外一些国家海上风电项目已经实现平价上网,我国海上风电也将快速迈入平价时代。张佳丽等^[6]在分析海上风电投资造价和投资结构的基础上,分析了投资、发电小时等影响因素对资本金财务内部收益率的敏感性程度,并提出海上风电补贴退坡后成本下降策略;蒋海波等^[7]分析了我国海上风电的发展历程、发展优势和面临挑战,全面总结发展条件,对各地海上风电项目进行经济性预测,并提出平价发展建议;农云庭等^[8]针对广西海上风电平价开发从政策和技术层面提出开发对策及建议;王素娟等^[9]以1.6GW规模风电项目为例,分析预测“十四五”期间福建省海上风电平价上网的经济效益;林延填^[10]从设计、施工、运维角度提出定制化措施,为海上风电平价阶段开发建设降本增效提供参考;施

泰^[11]以福清核电厂5km限制区海上风电项目为例,对福建省海上风电平价上网前景进行分析。

尽管对海上风电项目经济效益已有不少研究,但由于不同省份风资源情况、地质条件等都有差异,海上风电项目投资水平及经济效益不同。因此,本文将立足于广东省海上风电项目基本情况,探讨平价阶段项目的经济性,以期对未来广东省海上风电项目开发建设提供参考。

1 广东省海上风电投资水平及发展趋势分析

近年来,随着海上风电的大力发展,风力发电机组研发水平不断提高,专业化施工船舶也逐渐增多,设备价格及施工成本有了一定程度下降,近海风电项目单位千瓦投资也随之减少。对比2010年建成的上海东海大桥项目,“十三五”期间国内海上风电项目投资由2.37万元/kW下降至1.5万元/kW~1.8万元/kW。其中广东省项目由于地质条件复杂及台风影响严重,单位投资水平在1.7万元/kW~1.9万元/kW。“十三五”期间,国家为鼓励海上风电发展,出台了电价补贴政策,2018年以前,潮间带风电项目含税上网电价为0.75元/kWh,近海风电为0.85元/kWh^[12]。在此期间广东省开发的基本是近海浅水区项目,具有以下特点:(1)风电场规模小,容量在200~500MW;(2)风资源相对深远海较差,年等效利用小时在2500~2900h;(3)风机设备单机容量小,多为5.5MW/6.45MW;(4)南方区域受台风影响严重。因此,要求风机具有抗台特性,设备单价在6700元/kW左右。综合以上因素,风电场投资在1.9万元/kW左右。尽管设备价格较贵,年等效利用小时数相对较低,但是由于有了电价补贴,项目仍能取得良好的经济效益。

2019—2020年,海上风电进入了竞争性配置阶

段,电价政策有了新的变化。2019年5月,国家发展改革委印发《关于完善风电上网电价政策的通知》(发改价格〔2019〕882号)^[13],明确将海上风电标杆上网电价改为指导价,将符合规划、纳入财政补贴年度规模管理的新核准近海风电指导价在2019年按0.80元/kWh,2020年调整为0.75元/kWh;2020年1月,财政部、国家发展改革委、国家能源局联合印发《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》(财建〔2020〕4号)^[14],规定已核准(备案)的存量海上风电项目在2021年12月31日之前全部并网在合理利用小时内可享受相应补贴政策,新增海上风电项目将不再纳入中央财政补贴范围;同年9月印发了财建〔2020〕426号^[15],对财建〔2020〕4号有关事项进行了补充说明,进一步明确各类项目全生命周期合理利用小时数的规定,其中海上风电合理利用小时数为5.2万h。以上政策出台引起了海上风电行业市场大变动,已核准的项目为实现2021年全容量并网,纷纷抢占市场资源,形成了海上风电“抢装潮”。“抢装潮”期间,钢材价格、海缆价格不断上涨,施工资源更是成为卖方市场,各种关键施工船机价格飙涨,项目建设成本大幅增加,实际投资高达2万元/kW。

进入“十四五”期间,海上风电快速进入平价时代,项目开发面临巨大压力。平价阶段海上风电的发展需要上下游产业共同努力,以实现降本增效。投资企业在海上风电开发前期积极发挥主体作用,进行大量调研,统筹资源,整合信息,进行大量测算,以做出合理决策。风机设备厂家不断突破,在现有研发基础上设计更大单机容量的机型以降低投资,平价阶段风机容量已经由6.45 MW发展为10~16 MW,机组普遍处于设计认证阶段,2023年大部分机型将实现量产。未来,随着项目不断向深远海开发,单机容量有进一步增大的可能。随着风机单机容量增大,基础重量增加,现有的施工船机仅有少数满足施工要求。施工企业为适应平价阶段项目特点,不断改进及建造施工船机,以满足未来项目施工需求。为了促进海上风电发展,在国家补贴取消后,广东省首先下发了地方补贴标准的通知,给行业发展带来很大鼓舞,有利于项目开发由补贴向平价平稳过渡^[16]。根据粤府办〔2021〕18号^[17]的通知,省财政对2018年底前已完成核准、在

2022—2024年全容量并网的省管海域项目进行补贴,补贴标准依次为1500元/kW、1000元/kW和500元/kW;2025年以后的并网项目不再给予补贴。

根据平价期间已招标的海上风电项目,风机设备价格不断下降,已由2021年5200元/kW下降至4000元/kW以下,“十四五”末期风机设备价格更是跌破3000元/kW。风机设备价格降低较大程度减缓了投资压力,平价阶段广东省海上风电项目单位投资已由1.65万元/kW下降至1.2万元/kW。尽管无法和补贴电价时期经济效益相比,但经过多方努力,亦是平价阶段的进步。为降低海上风电投资成本,未来海上风电项目将朝着规模化、集约化方向发展,尝试与海洋牧场、海上光伏、海洋制氢等相结合,多措并举,进一步提升项目经济性和社会效益。

2 广东省某海上风电场项目测算

本节选取平价阶段广东省某海上风电项目为例,以2021年平均价格水平为基准,贷款利率按2021年LPR利率4.65%,对项目投资及经济性进行测算。

2.1 项目概况

广东省某近海深水区海上风电项目规划装机容量为1000 MW,选择单机容量为11 MW的风电机组,共布置91台风机。风电场中心离岸距离约65 km,水深在35~50 m之间,风机基础为四桩导管架基础,采用交流送出方式。

2.2 项目造价分析

本项目风机设备单价取4500元/kW,风机吊装及导管架基础施工合计为1870万元/座。经测算,项目单位千瓦静态投资约1.6万元/kW。

根据以上投资情况,对项目各部分投资占比进行分析,如图1所示。

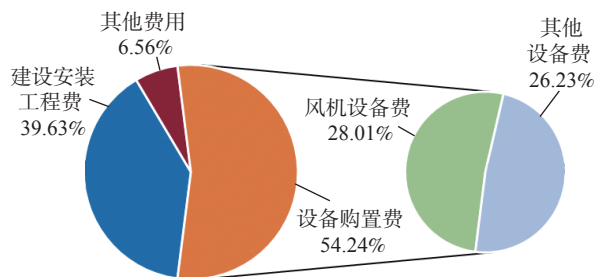


图1 各部分投资占比

Fig. 1 Investment proportion of each part

由图 1 可知, 对于海上风电项目, 设备购置费占总投资比例超过 50%, 且设备购置费中风机设备费占比超过一半, 因此风机设备价格对海上风电经济效益影响显著。随着研发技术不断成熟及产业链的逐渐完善, 风机设备价格呈下降趋势, 有利于海上风电平价阶段发展。

2.3 项目经济性测算

根据国家能源局发布的《风电场项目经济评价规范》(NB/T 31085—2016)^[18], 对项目进行经济效益测算。项目主要计算参数如表 1 所示。

表 1 主要计算参数

Tab. 1 Main calculation parameters

名称	参数值
装机容量/MW	1 000
工期/月	30
年运行小时数/h	3 664
运营期/a	25
资本金比例/%	20
贷款利率/%	4.65
流动资金/(元·kW ⁻¹)	40
定员/人	100
人均年工资及福利/万元	16
材料费指标/(元·kW ⁻¹)	30
其他费指标/(元·kW ⁻¹)	30
折旧年限/a	20
修理费率/%	0.5递进至3.0
保险费率/%	0.35

2021 年 6 月 7 日, 国家发展改革委发布《关于 2021 年新能源上网电价政策有关事项的通知》(发改价格〔2021〕833 号)^[19], 文中指出自 2021 年起, 新核准(备案)海上风电项目上网电价由当地省级价格主管部门制定, 具备条件的可通过竞争性配置方式形成。当前, 广东省价格主管部门针对海上风电上网电价暂无新的规定, 省内项目多以燃煤发电基准上网电价进行经济性分析。

根据以上计算参数, 在广东省燃煤发电基准含税上网电价 0.453 元/kWh 的条件下, 测算项目主要技术经济指标, 且与补贴电价时期的经济性比较, 补充含税上网电价 0.75 元/kWh 的测算。计算结果如表 2 所示。

根据以上测算结果可以看出, 在平价上网情况下, 项目收益率下降明显。对投资者而言, 为响应

表 2 主要技术经济指标表

Tab. 2 Main technical and economic indicators

名称	含税上网电价		变化幅度
	0.453 元/kWh	0.75 元/kWh	
项目投资财务内部收益率(税前)/%	6.49	14.47	55.15
项目投资财务内部收益率(税后)/%	5.53	12.66	56.32
资本金财务内部收益率/%	7.43	40.14	81.49
项目投资回收期(税后)/a	14.60	8.89	—

国家“3060 战略”, 提高项目可行性, 需从多方面考虑提升项目经济效益。

3 平价阶段不同影响因素的敏感性分析

结合海上风电项目投资占比情况及项目经济分析参数, 本节将从风机设备价格、贷款利率、单位投资及年等效利用小时数多因素作用、政府补贴几个方面分别探讨对项目经济性的影响。

3.1 风机设备价格影响

根据项目造价分析可知, 海上风电项目风机设备费占总投资比例较大, 接近 30%。根据前述分析, 风机设备价格呈下降趋势。广东省首个海上风电试点工程——珠海桂山海上风电场示范项目于 2016 年开工建设^[20], 装机容量为 120 MW, 包括 34 台 3 MW 和 3 台 6 MW 风机。此后直至 2020 年以前风机设备单机容量多为 5.5 MW/6.45 MW, 设备单价基本在 6 500~7 300 元/kW。2020 年以后, 国家陆续出台新的电价政策, 尤其是(2021) 833 号文出台后, 海上风电迅速迈入平价上网阶段。为满足平价阶段项目经济性的需求, 经过数年的积累与经验, 各风机厂家陆续推出 10 MW 及以上类型风机, 通过大容量风机为项目降本增效发力, 风机设备价格也随着核心部件逐渐国产化而降幅明显。图 2 为统计的近几年广东省项目风机价格变化趋势图。

为分析风机设备价格影响, 假定设备单价降幅按 300 元/kW 递减, 风机价格由 4 500 元/kW 变化至 2 400 元/kW, 进行经济性分析, 计算结果如图 3 所示。

由图 3 可知, 在一定范围内各收益率随风机设备价格下降不断增加, 且呈线性关系。资本金财务内部收益率受风机设备价格影响更加明显, 项目投

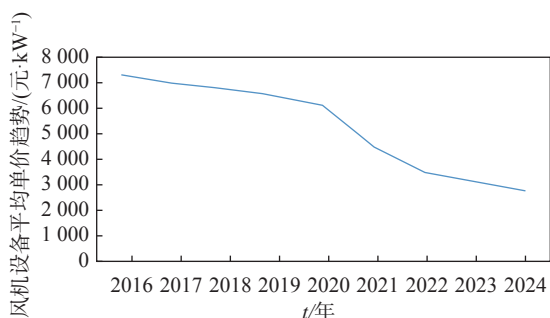


图2 广东省风机价格变化趋势

Fig. 2 Trends in wind turbine prices in Guangdong Province

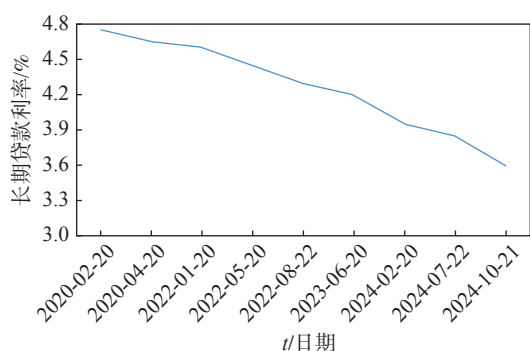


图4 长期贷款利率变化趋势

Fig. 4 Trend in long-term loan interest rate

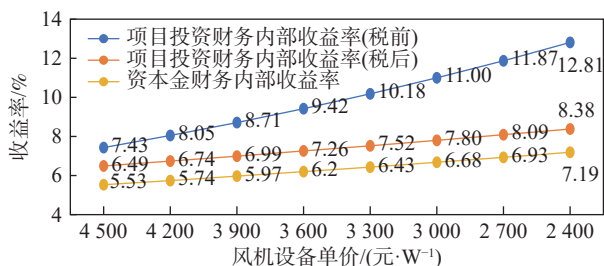


图3 不同风机设备单价下收益率变化

Fig. 3 FIRR at different unit prices of wind turbine equipment

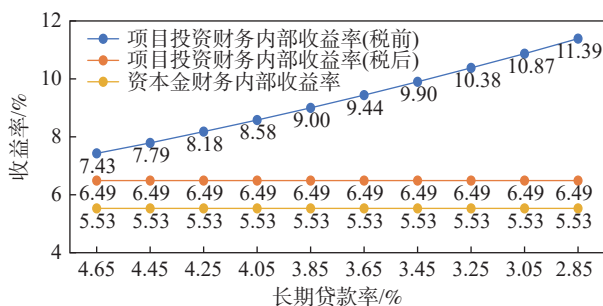


图5 不同贷款利率下收益率变化

Fig. 5 FIRR at different loan interest rates

资财务内部收益率税前及税后变化幅度接近。当风机设备价格下降 1 500 元/kW 时，资本金财务内部收益率由 7.43% 提高至 11.00%，增幅达 48.05%；项目投资财务内部收益率（税前）由 6.49% 提高至 7.80%，项目投资财务内部收益率（税后）由 5.53% 提高至 6.68%，增幅分别为 20.18% 和 20.80%。因此，随着风机设备价格下降能较好地提高项目经济效益。

3.2 贷款利率影响

海上风电项目通常投资金额较大，资金使用周期长，资金筹集大多采用银行贷款的方式，因此银行利率对项目收益率有一定影响。2019 年 8 月以来，长期贷款利率采用 LPR 浮动利率，图 4 统计了近几年利率变化情况，可以看出利率呈降低趋势。本节以长期贷款利率 4.65% 为基数，结合利率变化下行趋势，考虑利率变化幅度为 0.2，分别计算利率为 4.65%、4.45%、4.25%、4.05%、3.85%、3.65%、3.45%、3.25%、3.05%、2.85% 时的收益率情况，计算结果如图 5 所示。

由图 5 可知，在一定范围内资本金财务收益率

随贷款利率下降不断增加，且呈线性关系。因此，贷款利率下行趋势对提高项目经济效益有利。

3.3 单位投资和年等效利用小时联动变化影响

海上风电项目销售收入主要为售电收入，因此发电量越大，经济性越高。场址风资源情况决定了项目年等效利用小时数，进而影响项目收益率，因此对项目前期决策相当重要。广东省粤东区域年等效利用小时 2 900~3 700 h，粤西区域年等效利用小时 2 600~3 500 h，粤东区域风资源情况优于粤西区域。此外，广东省海域地质条件复杂，不同场址条件下风机基础选型不同，主要有非嵌岩单桩、嵌岩单桩、非嵌岩导管架、嵌岩导管架等，不同基础型式投资差异较大。结合广东省海上风电项目风资源情况及造价水平差异，假定项目年利用小时数由 2 600~3 800 h，递增幅度为 200 h，单位静态投资变化由 1.0 万元/kW~1.8 万元/kW，递增幅度为 1 000 元/kW，分别计算在不同投资和年利用小时数组合的情况下项目的资本金财务内部收益率。计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知，当年等效利用小时数低于 3 000 h

表 3 不同单位投资及年等效利用小时下资本金财务内部收益率

Tab. 3 Capital financial internal rate of return at different unit investments and annual equivalent utilization hours %

单位千瓦静态投资/ (万元·kW ⁻¹)	年等效利用小时数/h						
	2 600	2 800	3 000	3 200	3 400	3 600	3 800
1.0	11.44	15.15	19.34	23.92	28.83	33.93	39.11
1.1	7.85	10.79	14.07	17.73	21.75	26.07	30.61
1.2	5.11	7.61	10.26	13.20	16.45	20.01	23.84
1.3	2.49	5.10	7.41	9.83	12.49	15.40	18.58
1.4	-0.13	2.69	5.09	7.25	9.46	11.89	14.52
1.5	-2.75	0.27	2.87	5.09	7.10	9.14	11.38
1.6	—	-2.13	0.61	3.02	5.09	6.98	8.87
1.7	—	-4.61	-1.62	0.90	3.16	5.08	6.86
1.8	—	—	-3.91	-1.18	1.16	3.28	5.08

时，在平价上网条件下，单位千瓦静态投资不超过 1.4 万元/kW 项目有一定的经济性，单位造价越低，经济效益越好，可为近海浅水区项目提供参考。当年等效利用小时数超过 3 400 h 时，在满足项目基本可行的条件下，可承受的投资增加，单位静态投资可达 1.5 万元/kW 以上，且年等效利用小时数越高，容许投资越大，可为近海深水区项目提供参考。

3.4 136 号文对海风项目的影响

2025 年 1 月 27 日，国家发展改革委、国家能源局联合印发了《关于深化新能源上网电价市场化改革 促进新能源高质量发展的通知》（发改价格〔2025〕136 号）（以下简称“136 号文”）^[21]，标志着新能源项目全面进入市场化阶段，这也是推动新能源项目高质量发展，公平参与电力市场的必经之路。

136 号文主要内容有上网电量原则上全部进入电力市场，上网电价通过市场交易形成；区分存量增量项目，采用“差价结算”机制，分别规定了存量和增量项目的机制电量、机制电价及执行期限。文件要求各地在 2025 年底前出台并实施具体方案。

海上风电作为新能源项目中的重要组成部分，同样要参与市场竞争^[22-23]。但是对比陆上风电、光伏等新能源项目，海上风电建设难度更大、成本更高，不具有竞争优势。因此在政府层面，如何在不影响投资积极性的前提下制定合理的政策措施尤为重要；对投资商而言，上网电量及电价的不确定性使得项目前期投资决策变得困难。

当前广东、山东、广西、湖南等地已陆续发布

新能源市场化改革的具体实施方案（征求意见稿），对于存量项目，竞价上限基本为各地燃煤标杆电价，增量项目竞价上下限结合综合建设成本和运行特性制定。广东省发展改革委 2025 年 5 月发布了《关于深化新能源上网电价市场化改革 促进新能源高质量发展实施方案》（征求意见稿），文中规定了存量项目机制电价参考广东省燃煤发电基准价 0.453 元/kWh 执行，110 kV 以下项目机制电量比例取 100%，其他项目取 70%；增量项目机制电价竞价分海上风电、其他风电和光伏项目 3 类，2025 年，海上风电项目竞价上下限分别为 0.453 元/kWh 和 0.35 元/kWh，单个项目竞价电量比例与对应电压等级的存量项目机制电量保持一致，但不高于 90%。由此可见，海上风电项目之间进行市场化竞争最终回归到竞投资和风资源方面，投资低、年等效利用小时数高的项目在市场竞争中具有较大优势。

4 结论

本文立足于平价阶段广东省海上风电项目进行分析，首先阐述了广东省海上风电投资水平发展趋势及相关政策变化；然后以广东省某海上风电场项目为例进行投资分析及经济性测算；最后讨论了不同因素对项目经济效益影响，得出的主要结论如下：

1) 风机设备价格在项目总投资中占比较大，对项目经济效益影响显著。随着海上风电快速发展及设备制造技术成熟，目前风机设备单机容量不断增大且价格不断降低，显著提高了项目经济效益。

2) 贷款利率呈下行趋势, 有利于资本金财务内部收益率增加。

3) 资本金财务内部收益率随年等效利用小时数增加而增加, 随单位投资增加而降低。当年等效利用小时数低于 3 000 h 时, 在平价上网条件下, 单位千瓦静态投资不超过 1.4 万元/kW 项目有一定的经济性。不同单位投资与年等效利用小时数对应的收益率可为项目前期开发决策提供参考。

4) 136 号文的印发标志着新能源项目全面进入市场化阶段。对于海上风电项目而言, 投资低、年等效利用小时数高的项目在市场竞争中具有较大优势。

参考文献:

- [1] 刘军, 安柏任, 张维博, 等. 大型风力发电机组健康状态评价综述 [J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(1): 176-187. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220373.
LIU J, AN B R, ZHANG W B, et al. Review of health status evaluation of large wind turbines [J]. *Power system protection and control*, 2023, 51(1): 176-187. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.220373.
- [2] 王诗超, 刘嘉畅, 刘展志, 等. 海上风电产业现状及未来发展分析 [J]. *南方能源建设*, 2023, 10(4): 103-112. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010.
WANG S C, LIU J C, LIU Z Z, et al. Analysis of current situation and future development of offshore wind power industry [J]. *Southern energy construction*, 2023, 10(4): 103-112. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2023.04.010.
- [3] 陶思钰, 江福庆. 集群化发展模式下风电场预测、规划及控制关键技术综述 [J]. *电力工程技术*, 2024, 43(1): 86-99. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.010.
TAO S Y, JIANG F Q. Review of the key technologies of wind farm cluster prediction, planning and control [J]. *Electric power engineering technology*, 2024, 43(1): 86-99. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.010.
- [4] 马希磊, 蒋东翔, 张凯. 碳中和目标下风电行业质量数字化战略转型研究 [J]. *内蒙古电力技术*, 2025, 43(2): 92-100. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0027.
MA X L, JIANG D X, ZHANG K. Research on digital strategic transformation of quality in wind power industry under goal of carbon neutrality [J]. *Inner Mongolia electric power*, 2025, 43(2): 92-100. DOI: 10.19929/j.cnki.nmgdljs.2025.0027.
- [5] 宁萌萌, 冯庆斌, 王丽莎, 等. 含海上风电的虚拟电厂参与日前电能量市场及日内调度的两阶段协同优化 [J]. *油气与新能源*, 2024, 36(6): 53-62, 74. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2024.06.007.
NING M M, FENG Q B, WANG L S, et al. Two-stage collaborative optimization involving virtual power plant with offshore wind power participation in the day-ahead energy market and intra-day scheduling [J]. *Petroleum and new energy*, 2024, 36(6): 53-62, 74. DOI: 10.3969/j.issn.2097-0021.2024.06.007.
- [6] 张佳丽, 黄洁亭. 海上风电成本分析与收益敏感性研究 [J]. *水力发电*, 2018, 44(12): 105-108. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2018.12.026.
ZHANG J L, HUANG J T. Analysis on cost and revenue sensitivity of offshore wind power [J]. *Water power*, 2018, 44(12): 105-108. DOI: 10.3969/j.issn.0559-9342.2018.12.026.
- [7] 蒋海波, 刘长栋. 我国海上风电发展现状研究及平价发展建议 [J]. *煤质技术*, 2021, 36(6): 70-76. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7677.2021.06.011.
JIANG H B, LIU C D. Research on the development of offshore wind power in China and suggestions for parity development [J]. *Coal quality technology*, 2021, 36(6): 70-76. DOI: 10.3969/j.issn.1007-7677.2021.06.011.
- [8] 农云庭, 段宜平. 广西海上风电平价上网开发对策浅析 [J]. *红水河*, 2021, 40(6): 59-62. DOI: 10.3969/j.issn.1001-408X.2021.06.012.
NONG Y T, DUAN Y P. Development countermeasures of offshore wind power grid parity in Guangxi [J]. *Hongshui River*, 2021, 40(6): 59-62. DOI: 10.3969/j.issn.1001-408X.2021.06.012.
- [9] 王素娟, 周遵凯, 肖宣炜. 福建省海上风电平价上网效益分析 [J]. *能源与环境*, 2021(5): 44-45, 51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2021.05.015.
WANG S J, ZHOU Z K, XIAO X W. The economic benefit analysis of offshore wind power grid parity in Fujian Province [J]. *Energy and environment*, 2021(5): 44-45, 51. DOI: 10.3969/j.issn.1672-9064.2021.05.015.
- [10] 林延填. 平价上网时代海上风电项目开发对策探讨 [J]. *水利科技*, 2022(3): 24-26, 40.
LIN Y T. Discussion on development strategies of offshore wind power projects in the era of affordable internet era [J]. *Hydraulic science and technology*, 2022(3): 24-26, 40.
- [11] 施泰. 福建省海上风电平价上网前景分析 [J]. *水利科技*, 2022(1): 52-54.
SHI T. Prospect analysis of Fujian offshore wind power parity to the power grid [J]. *Hydraulic science and technology*, 2022(1): 52-54.
- [12] 国家发展改革委. 关于海上风电上网电价政策的通知 [EB/OL]. (2014-06-05) [2023-09-26]. http://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201406/t20140619_964151.html.
National Development and Reform Commission. Notice on the on-grid electricity price policy for offshore wind power [EB/OL]. (2014-06-05) [2023-09-26]. http://www.ndrc.gov.cn/xxgk/zcfb/tz/201406/t20140619_964151.html.
- [13] 国家发展改革委. 关于完善风电上网电价政策的通知 [EB/OL]. (2019-05-21) [2023-09-26]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-05/25/content_5394615.htm.

- National Development and Reform. Notice on improving the on-grid electricity price policy for wind power [EB/OL]. (2019-05-21) [2023-09-26]. http://www.gov.cn/xinwen/2019-05/25/content_5394615.htm.
- [14] 财政部,国家发展改革委,国家能源局.关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见[EB/OL].(2020-01-20) [2023-09-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/03/content_5474144.htm.
- Ministry of Finance of the People's Republic of China. National Development and Reform Commission National Energy Administration. Several opinions on promoting the healthy development of non-hydropower renewable energy generation [EB/OL]. (2020-01-20) [2023-09-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-02/03/content_5474144.htm.
- [15] 财政部,国家发展改革委,国家能源局.关于《关于促进非水可再生能源发电健康发展的若干意见》有关事项的补充通知[EB/OL].(2020-09-29) [2023-09-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-10/21/content_5552978.htm.
- Ministry of Finance of the People's Republic of China National Development and Reform Commission National Energy Administration. Supplementary notice on matters related to the opinions on promoting the healthy development of non-water renewable energy generation [EB/OL]. (2020-09-29) [2023-09-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-10/21/content_5552978.htm.
- [16] 陈皓勇,席松涛.海上风电成本构成及价格机制[J].风能,2022(1): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2022.01.012.
- CHEN H Y, XI S T. Cost composition and price mechanism of offshore wind power [J]. Wind energy, 2022(1): 12-15. DOI: 10.3969/j.issn.1674-9219.2022.01.012.
- [17] 广东省人民政府办公厅.关于印发促进海上风电有序开发和相关产业可持续发展实施方案的通知[EB/OL].(2021-06-01) [2023-09-26]. http://www.gd.gov.cn/zwgk/gongbao/2021/17/content/post_3367237.html.
- People's Government of Guangdong Province. Notice on the issuance of implementation plan for promoting orderly development of offshore wind power and sustainable development of related industries [EB/OL]. (2021-06-01) [2023-09-26]. http://www.gd.gov.cn/zwgk/gongbao/2021/17/content/post_3367237.html.
- [18] 国家能源局.风电场项目经济评价规范:NB/T 31085—2016[S].北京:新华出版社,2016.
- National Energy Administration. Code for economic evaluation of wind farm: NB/T 31085—2016 [S]. Beijing: Xinhua Publishing House, 2016.
- [19] 国家发展改革委.关于2021年新能源上网电价政策有关事项的通知[EB/OL].(2021-06-07) [2023-09-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/11/content_5617297.htm.
- National Development and Reform Commission. Notice on matters related to the 2021 new energy on-grid electricity price policy [EB/OL]. (2021-06-07) [2023-09-26]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2021-06/11/content_5617297.htm.
- [20] 郑钊颖,冯奕敏.广东海上风电产业发展路径与对策研究[J].南方能源建设,2020,7(4): 18-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.003.
- ZHENG Z Y, FENG Y M. Research on the development approach and policy recommendations of Guangdong offshore wind power industry [J]. Southern energy construction, 2020, 7(4): 18-25. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2020.04.003.
- [21] 国家发展改革委,国家能源局.关于深化新能源上网电价市场化改革促进新能源高质量发展的通知[EB/OL].(2025-01-27) [2025-07-07]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202502/content_7002959.htm.
- National Development and Reform Commission. National Energy Administration. Notice on deepening market-oriented reform of new energy feed-in tariffs and promoting high-quality development of new energy [EB/OL]. (2025-01-27) [2025-07-07]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202502/content_7002959.htm.
- [22] 陈艳波,董华玉,余永康,等.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方法[J].电力系统保护与控制,2025,53(15): 48-58. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241433.
- CHEN Y B, DONG H Y, SHE Y K, et al. Multi-stage coordinated planning method for low-carbon power systems considering wind power decommissioning and reconstruction and coal power flexibility upgrade [J]. Power system protection and control, 2025, 53(15): 48-58. DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.241433.
- [23] 宋家康,赵建勇,孙海霞,等.基于多目标协同训练的风电功率预测提升算法[J].电力工程技术,2023,42(6): 232-240. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.025.
- SONG J K, ZHAO J Y, SUN H X, et al. Wind power prediction and improvement algorithm based on multi-objective collaborative training [J]. Electric power engineering technology, 2023, 42(6): 232-240. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2023.06.025.

作者简介:



赵瑞

陈颖

1989-, 女, 高级工程师, 硕士, 主要从事电力建设工程技术经济研究工作 (e-mail) chenying@gedi.com.cn。

赵瑞 (第一作者, 通信作者)

1990-, 女, 工程师, 硕士, 主要从事电力建设工程技术经济研究工作 (e-mail) zhaorui@gedi.com.cn。

(责任编辑 孙舒)