

# 深远海海上风电项目降本增效路径探讨

黄智军, 孙凌云<sup>✉</sup>

(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] 为更好推进深远海海上风电项目开发, 文章从深远海海上风电投资构成情况出发。[方法] 引入平准化度电成本 LCOE 方法, 基于项目全生命周期角度, 提出了海上风电降本增效主要路径及方法。[结果] 并以广东海域某一实例, 验证了海上风电降本增效路径的有效性。[结论] 结果表明, 持续在核心领域的技术突破及不断完善的产业链, 是深远海海上风电项目降本增效的关键。

**关键词:** 深远海风电; 降本增效; LCOE

中图分类号: TK89; F42

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)S1-0034-04

开放科学(资源服务)二维码:



## Exploring the Path of Cost Reduction and Efficiency Enhancement for Deep Sea Offshore Wind Power Projects

HUANG Zhijun, SUN Lingyun<sup>✉</sup>

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

**Abstract:** [Introduction] In order to better promote the development of deep sea offshore wind power projects, the paper starts from the composition of offshore wind power investment. [Method] Based on perspective of project lifecycle cost and the method of LCOE, the paper proposed the main path and methods for cost reduction and efficiency enhancement of offshore wind power. [Result] Finally, combined with a case study in Guangdong sea area, the paper verifies the effectiveness of the cost reduction and efficiency enhancement path for offshore wind power. [Conclusion] The results indicate that continuous technological breakthroughs in core areas and continuous improvement of the industrial chain are the keys to reducing costs and increasing efficiency in deep sea offshore wind power projects.

**Key words:** deep sea offshore wind power; cost reduction and efficiency enhancement; LCOE

2095-8676 © 2023 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

在“双碳”目标指引下, 全球能源结构正在重塑, 海上风电作为我国推进能源转型的重要手段, 近年来发展迅猛, 不仅连续三年年装机容量跃居世界第一, 截至 2022 年年底, 我国海上风电装机容量达到 32.5 GW, 持续保持海上风电装机容量全球第一。我国海上风能资源更丰富, 近海水深 5~50 m 范围内, 风能资源技术开发量为 500 GW, 深远海风能可开发容量更是近海的 3 倍以上。随着海上风电项目布局的加快和对海域环境的不断探索, 海上风电产业逐

渐向大功率、深远海挺进。《“十四五”可再生能源发展规划》也提出, 优化近海海上风电布局, 开展深远海海上风电规划。

2021 年后, 随着国补退出等因素的影响, 我国多地海上风电建设呈现疲软。主要原因是, 一方面, 国补退出后, 海上风电的电价基本降低 50% 以上, 给海上风电项目收益带来很大的影响; 另一方面, 海上风电往深远海发展, 项目水深、离岸距离及恶劣海况, 都将给项目成本带来很大上涨压力。

文章将对目前深远海海上风电的造价构成情况

进行分析,通过引入平准化度电成本(Levelized Cost of Energy, LCOE)方法,从全生命周期成本角度,提出实现深远海海上风电项目降本增效的路径和方法,最后结合广东省某一行风电实例,验证降本增效路径的有效性。

## 1 深远海海上风电项目投资构成

与近海浅水区海上风电场工程相比,深远海海上风电有以下特点:

### 1) 水深普遍较深

我国已建成近海浅水区海上风电项目水深条件为 10~40 m 之间,在这种水深条件下,无论是设计、施工及管理,都已经非常成熟,风机基础主要以单桩基础为准,而我国深远海海上风电项目,水深通常在 40 m 以上,设计方案及施工方案和浅水区存在较大差异,风机基础形式主要是导管架基础甚至漂浮式基础,对于主体施工要求的船机也较高。

### 2) 离岸距离

我国已建成近海浅水区海上风电项目中间离岸距离通常在 50 km 以内,在这种离岸距离下,送出海缆电压等级通常为 220 kV 交流送出。同时,离岸近,对于施工组织还是未来运维组织,都较为便利。而我国深远海海上风电项目,中心离岸距离都是 50 km 以上,为减少送出过程中的损耗,送出方案通常为更高等级的交流送出方案(如 500 kV)或者柔性直流送出方案。

### 3) 风资源

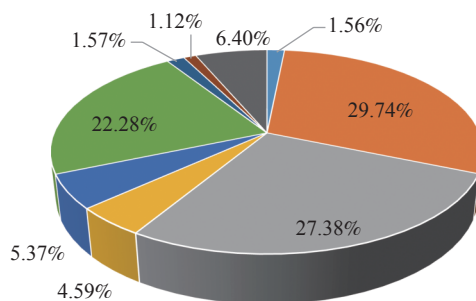
我国深远海海上风电风资源要普遍好于近海浅水区。具备很大规模的开发容量。

图 1 为当前导管架基础的深水区海上风电场工程投资构成图。

图 1 中可以看出,深远海海上风电工程投资构成特点如下:

1) 风机、塔筒购置及安装费仍然是整个风电场投资占比最多的部分。但和近海浅水区风机、塔筒购置及安装费占比 50% 左右相比,深远海风机、塔筒购置及安装费的占比下降较多。

2) 在深远海海上风电场工程中,风机基础的投资大幅上升,从近海浅水区的 20% 左右上升到 27.38%。同时随着水深的增加,风机基础的投资及占比将进一步增加。



注: ■ 施工辅助工程; ■ 风机及塔筒设备购置及安装;  
■ 风机基础; ■ 集电海缆;  
■ 海上升压站及补偿站; ■ 登陆海缆工程;  
■ 陆上集控中心; ■ 其他工程;  
■ 其他费用。

图 1 深水区海上风电场工程投资构成

Fig. 1 Investment composition of offshore wind farm project in deep water area

3) 登陆海缆工程也是深远海海上风电工程投资的重要组成部分,随着项目中心离岸距离的增加,登陆海缆工程的投资及占比将进一步增加。

## 2 基于 LCOE 降本增效方法

在项目经济评价方法中,平准化度电成本 LCOE 是一种用于分析各种发电技术成本问题的主要指标。国际上通行用 LCOE 作为衡量项目全生命周期收益的指标,就是对项目生命周期内的成本和发电量进行平准化后计算得到的发电成本,即生命周期内的成本现值/生命周期内发电量现值<sup>[1]</sup>。

LCOE 是从项目全周期成本的角度分析项目成本收益的方法,总体说来,该方法分为 3 个组成部分:

### 1) 项目建设总投资

海上风电场工程的建设投资由施工辅助工程费、设备及安装工程费、建设工程费、其他费用和预备费组成,是项目在建设期为建设项目投入的所有资金。

### 2) 运维成本

运维成本是海上风电场项目在运营期内发生的所有费用,根据《风电场项目经济评价规范》(NB/T 31085—2016),运维成本可以分为职工工资及福利费、材料费、修理费、保险费、其他费用、海域使用金及拆除费用等。

### 3) 发电量

发电量在 LCOE 的计算中作为分母,也是 LCOE 的重要考量之一。

基于 LCOE 降本增效方法,主要是围绕以上 3 个组成部分开展,主要原则如下:

1)降本增效的方案主要围绕建设总投资、运维成本及发电量 3 个指标进行。例如,降低初始建设期投资、降低运维成本或者增加发电量等方案。

2)LCOE 是评价降本增效的重要指标之一,不同的降本增效效果比较,谁的 LCOE 指标低,谁的经济性效果会更好。

### 3 深远海海上风电项目降本增效路径

#### 3.1 建设投资角度降本增效路径

海上风电建设投资的高低,对于整个项目的收益影响最大,因此,对于深远海海上风电项目来说,寻找降低建设投资的路径,将影响整个项目降本增效效果。建设投资角度降本增效路径主要如下:

##### 1)规模化开发

规模化开发,是深远海海上风电项目降低建设投资重要路径。近海浅水区海上风电项目,主要开发规模为 300 MW 或 400 MW。如果深远海海上风电还按这样规模开发,由于场址水深且离岸距离远,BOP 部分(海上升压站或换流站、送出海缆、陆上集控中心或陆上换流站)的单位千瓦投资将大幅度增加。因此,深远海海上风电项目开发规模,建议按 1 GW 及以上规模开展。

##### 2)全产业链的技术提升

海上风电未来技术趋势要求是全产业链的技术提升,主要如下:

##### (1)风机机组大型化

2021 年前,我国投产的海上风电单机容量都不超过 7 MW,随着国补退坡后,风机机组大型化成为主流趋势,仅 2022 年上本年,8 MW 及以上海上风电机组新签订单份额已经超过了 75%。风机机组大型化,对于风电机组的产业链提出更高的要求,风机大型化发展带动了叶片尺寸的大型化发展,新型材料碳纤维技术将保持叶片大型化和轻量化,提高叶片运行的可靠性,成为大型叶片生产应用的关键。在安装与运维方面,将要求工程管理向更加智能化、高效化发展。

##### (2)漂浮式基础

漂浮式基础目前我国处于刚刚开始阶段,随着深远海海上风电发展,补充完善漂浮式基础的制

作、运输施工及维护等产业链,是降低深远海海上风电建设投资重中之重。

##### (3)优化设计技术

对于深远海海上风电,漂浮式基础是重要的基础形式,对于漂浮式海上风电降本增效实现路径,首先要重视整个风电场的整体系统设计,在优化定制大容量高效率风力发电机组的同时,优化系泊系统单元及浮体并对整体系统进行一体化设计,根据我国深远海海况及漂浮式海上风电设计特点,改进输送机安装设备,实现施工技术的突破<sup>[2]</sup>。

深远海海上风电场工程另一个重要组成为长距离柔性直流输电技术或高压交流输电技术。对于长距离柔性直流输电的降本增效路径,首先要优化海上换流站的布置,优化海缆路由走向,尽可能降低海缆路由长度;其次,在保证电能输送安全性、可靠性的基础性,尽可能优化柔直海缆截面,降低投资。

#### 3.2 运维成本角度降本增效路径

1)区域化、集约化运维,通过科学的运维管理,对区域内的海上风电场工程运维资源进行科学配置,最大化利用运维船舶资源,降低运维船机成本,同时,深远海海上风电由于离岸距离远,海况恶劣,区域化集约化运维可以更高效率满足海上风电运维工作,提高海上风电运维效率。

2)提高海上风电场工程智能化、数字化水平,通过构建智慧海上风电场工程,在运维期间,可以对于风电场的运行状态进行了解,优化运行维护策略,降低运营成本<sup>[3]</sup>。

#### 3.3 发电量角度降本增效路径

1)重视风机选型及微观选址工作,确保风场装机方案发电量。

2)风机设备招采过程中,需重视设备可利用率指标。

3)出现故障时,提高故障解除效率。

## 4 案例分析

以广东省粤东区域某深远海海上风电为例,为更好研究海上风电的降本增效路径及价格趋势,选择占总投资比例较大的 4 项作为影响投资的主要因素,分别为风机、塔筒购置及安装费、风机基础工程、登陆海缆及集电海缆工程及其他费用。

项目装机容量为 1 GW 级,风机基础采用导管

架基础,集电海缆电压等级采用 66 kV,建设一座 500 kV 的海上升压站及一座陆上集控中心,登陆海缆采用 500 kV 高压交流海缆。编制期价格水平年分别按 2022 年、2023 年及 2025 年,分别对应的机组单机功率分别为 11 MW、16 MW 和 18 MW。基于当前价格及预测价格,测算的结果如表 1 所示。

表 1 深远海海上风电投资预测

Tab. 1 Investment forecast of deep sea offshore wind power

年份	2022年	2023年	2025年
机组功率/MW	11	16	18
机组台数/台	91	63	56
风机、塔筒购置及安装费/(元·kW <sup>-1</sup> )	5 581	4 461	4 119
风机基础/(元·kW <sup>-1</sup> )	4 621	3 879	3 834
登陆海缆及集电海缆/(元·kW <sup>-1</sup> )	3 987	3 763	3 430
其他费用/(元·kW <sup>-1</sup> )	914	896	869
其他/(元·kW <sup>-1</sup> )	1 374	1 347	1 280
合计/(元·kW <sup>-1</sup> )	16 477	14 346	13 532

从表 1 中可以看出,风机机组大型化,是未来深远海海上风电降本增效路径上的必然趋势。风机机组大型化,不仅可以带来自身风机价格下降的驱动力,同时也可以给风机基础、集电海缆、塔筒设备等带来投资下降的可能性。

## 5 结论

结合深远海海上风电项目投资构成的特点,基于平准化度电成本 LCOE 方法,从建设投资、运维投资及发电量 3 个维度,提出了深远海海上风电项目降本增效路径,并通过一案例,验证了降本增效路径的合理性。

## 参考文献:

- [1] 余迪,张扬,史帅帅.海上风电项目平准化度电成本敏感性分析——基于蒙特卡洛方法[J].*工程经济*,2018,28(8):8-11. DOI: 10.19298/j.cnki.1672-2442.201808008.  
YU D, ZHANG Y, SHI S S. Sensitivity analysis of the levelized cost of electricity of offshore wind power projects: based on Monte Carlo method [J]. *Engineering economy*, 2018, 28(8): 8-11. DOI: 10.19298/j.cnki.1672-2442.201808008.
- [2] 余文博.“平价时代”的海上风电降本增效技术研究[J].*上海节能*,2022(4):468-475. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2022.04.016.  
YU W B. Research on cost reduction and efficiency enhancement technology of offshore wind power in “Parity Era” [J]. *Shanghai energy conservation*, 2022(4): 468-475. DOI: 10.13770/j.cnki.issn2095-705x.2022.04.016.
- [3] 张鑫凯.海上风电场成本测算及趋势分析[J].*科技展望*,2017,27(24):271-272. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8289.2017.24.242.  
ZHANG X K. Cost estimation and trend analysis of offshore wind farms [J]. *Science and technology*, 2017, 27(24): 271-272. DOI: 10.3969/j.issn.1672-8289.2017.24.242.

## 作者简介:



黄智军(第一作者)

1984-,男,高级工程师,硕士,主要从事海上风电造价方面的研究工作(e-mail)huangzhijun@gedi.com.cn。

黄智军

孙凌云(通信作者)

1986-,女,工程师,工学硕士,主要从事工程造价和电力项目管理方面的研究工作(e-mail)sunlingyun@gedi.com.cn。

(编辑 赵琪)