

基于平价上网的海上风电可靠性研究

周琼芳¹, 张全斌²

(1. 浙江省电力设计院有限公司, 杭州 310012; 2. 浙江省能源集团有限公司, 杭州 311121)

摘要:海上风电是最具规模化开发价值的可再生能源, 预计 2020 年我国累计装机容量突破 8.5 GW。海上风电的运维成本在度电成本占比 25%~40%。2019 年起国家推行风电平价上网, 对海上风电的发展带来深刻影响。通过海上风电度电成本分析, 建立成本—效益模型。研究发现, 风电设备的可靠性、可利用率决定了运维成本和度电成本的水平。基于成本—效益模型测算某海上风电项目的度电成本, 风机设备可利用率为 97.15% 时, 运维成本下降 26.88%, 度电成本最低, 为 0.575 2 元/kW·h。

关键词:海上风电; 平价上网; 度电成本; 可靠性; 可利用率

中图分类号: F224.5; TM614 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2019)10-0125-05

风电是技术最为成熟、最具规模化开发价值的可再生能源, 其中海上风电资源丰富、环境污染小, 备受关注^[1]。自 2010 年上海东海大桥风电场并网发电以来, 我国海上风电发展迅速。根据全球风能理事会 (GWEC) 数据统计, 截至 2018 年底, 全球海上风电累计装机容量达到 23.04 GW, 其中中国为 4.45 GW, 占比 19.3%, 见图 1。目前, 海上风电正进入加速发展阶段, GWEC 预测未来五年全球将新增装机 32~40 GW, 2020 年中国海上风电累计装机容量将突破 8.5 GW, 超过《风电发展第十三个五年规划》5 GW 的预测值。

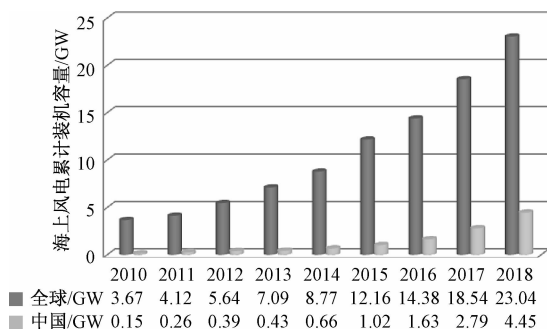


图 1 全球及中国海上风电累计装机容量统计图

近年来, 随着我国海上风电的技术进步和规模化开发, 投资成本不断下降, 为海上风电参与竞价上网和平价上网创造了条件。2018 年 5 月, 国家能源局《关于 2018 年度风电建设管理有关要求的通

知》(国能发新能〔2018〕47 号), 明确 2019 年起, 全国新增核准的海上风电全部采用竞价上网方式; 2019 年 1 月, 国家能源局出台《关于积极推进风电、光伏发电无补贴平价上网有关工作的通知》(发改能源〔2019〕19 号), 2019 年 5 月发布《关于公布 2019 年第一批风电、光伏发电平价上网项目的通知》(发改办能源〔2019〕594 号), 通知要求积极推进风电、光伏发电项目平价上网, 力争 2020 年全面实现平价上网。竞价上网和平价上网将不断拉低海上风电的上网电价, 对我国海上风电的发展带来深刻影响, 降低工程造价和运维成本将是海上风电生存和发展的关键途径。

本文通过海上风电度电成本分析, 建立成本—效益与设备可靠性(可利用率)之间的成本—效益模型, 依托浙江省某海上风电项目进行度电成本模拟测算, 解析成本与效益之间的关系, 为降低海上风电度电成本和优化运维策略提供思路和建议。

1 海上风电上网电价水平

目前, 我国海上风电上网电价(含补贴)为 0.85 元/kWh。基于沿海 9 省市的平均造价水平和年利用小时数, 项目资本金比例、贷款利率、资本金内部收益率分别按 30%、4.9%、10%, 上网电价测算见表 1^[2]。测算结果显示, 海上风电上网电价高于煤电标杆上网电价 0.352 8~0.479 元/kWh, 若按照通知精神, 推行平价上网, 海上风电将面临巨大的运维压力。

收稿日期: 2019-06-04

作者简介: 周琼芳(1973—), 女, 浙江诸暨人, 浙江省电力设计院有限公司, 财务产权部副主任, 高级会计师, 学士, 研究方向: 能源行业项目投资及财务管理。

表 1 我国沿海各省市海上风电上网电价测算表^[2]

序号	省份	年利用小时 h	平均造价 万元·kW ⁻¹	测算上网电价 元·kWh ⁻¹	煤电标杆上网电价 元·kWh ⁻¹
1	海南	2 625	1.85	0.839	0.429 8
2	广东	2 550	1.85	0.846	0.453
3	福建	3 100	1.95	0.746	0.393 2
4	浙江	2 500	1.75	0.836	0.415 3
5	上海	2 500	1.70	0.814	0.415 5
6	江苏	2 650	1.65	0.747	0.391
7	山东	2 550	1.80	0.841	0.394 9
8	河北	2 325	1.70	0.876	0.372
9	辽宁	2 575	1.80	0.834	0.374 9

2 基于度电成本的成本—效益模型

度电成本(Levelized Cost of Electricity, LCOE) 又称平准化度电成本^[3-4], 对发电项目生命周期内的综合成本和发电量进行平准化计算得到的发电成本, 即生命周期内的成本现值与生命周期内发电量的比值。度电成本理论广泛运用于风电、光伏等新能源发电项目的发电成本和上网电价测算^[5-6]。

成本—效益分析法基于度电成本, 通过海上风电综合成本与发电效益的分析与评价, 综合协调成本—效益之间的关系。成本定义海上风电场达到一定可靠性或可利用率水平需要增加的投资成本和运维成本, 效益则为发电增量获得的效益。

2.1 度电成本

度电成本(LCOE)是为了评估不同发电模式下的发电成本及费用构成^[6]。1995 年美国国家可再生能源实验室(NREL)提出平准化电力成本(Levelized cost of energy)^[3], 2006 年德国弗劳恩霍夫协会太阳能研究所(Fraunhofer—ISE)针对新能源发电项目提出度电成本(Levelized cost of electricity)^[4]。我国风电项目度电成本评估模型结合上述两种 LCOE 评估方法, 度电成本计算见公式 1。

$$LCOE = \frac{I - \frac{V_R}{(1+i)^N} + \sum_{n=1}^N \frac{(C_n + P_n)}{(1+i)^n}}{\sum_{n=1}^N Y_n} \quad (1)$$

式中, I : 投资成本, 项目开发、建设期间的资本投入所形成的成本, 包括设备购置费用、建筑工程费用、安装工程费用、前期开发费及项目建设期利息等; V_R : 固定资产残值; i : 折现率; n : 运行年份, 运行期 $N=25$ 年; C_n : 第 n 年的运维成本, 项目运营期保证设备正常运行所发生的维护成本, 主要包括检修费用、备品备件购置费、保险费、管理费等; P_n : 第 n 年的利息; Y_n : 第 n 年的发电量。

为了简化计算, 剔除资金的时间成本, 如公式 2 所示。

$$LCOE = \frac{I - V_R + \sum_{n=1}^N (C_n + P_n)}{\sum_{n=1}^N Y_n} = \frac{I - V_R + C + P}{Y} \quad (2)$$

结合公式 2, 分析影响度电成本的主要因素: ①投资成本 I 。海上风电的风机设备成本占投资成本的 40%~45%^[7], 海上风电规模化、风机容量升级以及风机设计制造成本下降均有助于降低投资成本; ②融资成本 P 。融资成本与投资成本、融资方案密切相关, 融资成本随着投资成本的下降而下降; ③运维成本 C 。风机设备的可靠性、可利用率直接影响到运维成本; ④发电量 Y 。发电量是度电成本的核心因素, 风机可靠性、可利用率直接影响发电量, 发电量能直接反映项目的运维水平; ⑤项目寿命 N 。提高项目寿命能有效分摊投资成本和运维成本, 同时能增加风电的发电量, 降低度电成本。

对于海上风电项目, 风机设备的可靠性(可利用率)对度电成本的影响最为显著。机组可靠性(成本)和经济性指标(效益)是成本分析、数学优化建模中最为核心的指标^[7]。机组可靠性的目标是极大化系统可利用率, 经济性指标则是极小化运维成本, 成本—效益模型通过这两个核心指标进行不断优化、不断平衡, 寻求最优的运维策略。

2.2 风机设备可利用率和设备可靠性

风机设备可利用率(Availability)指在规定条件下风机设备的可利用程度, 风电场的风机设备平均可利用率是指所有风机设备可利用率的算数平均值。风机设备可靠性(Reliability)是指风机设备的性能在时间上的稳定性程度, 即在一定时间内不发生问题或故障的概率。一般而言, 可利用率和可靠性均定义在

某个时间段的设备指标,如1个公历年。可利用率和可靠性的年平均数据是等同的。

按照北京鉴衡认证中心发布的《风力发电机组质量保证期验收技术规范》(CNCA/CTS 0004—2014),单台机组年可利用率不低于90%,整个风电场机组平均年可利用率不低于95%。据文献资料介绍,2009—2014年上海东海大桥风电场的机组年平均可利用率在93.5%~95.9%之间^[8];江苏某150 MW海上风电场2014年的机组年平均可利用率为97.59%^[9],两者年平均可利用率指标存在比较大的差异。上海东海大桥风电场的风机设备平均每年故障停机55次,长时间故障停机主要是齿轮箱、发电机和风机轴承的原因,其中50%的停运时间是由齿轮箱的故障造成的^[8],说明风机设备可靠性决定了风电场的年平均可利用率。

2.3 度电成本与设备可利用率关系式的拟定

按照《风力发电机组质量保证期验收技术规范》的要求,风电场风机设备平均年可利用率以95%为基准点,可利用率取值范围[95%~100%],数值模拟的单位精度取0.5%。

1)投资成本 I :根据数据统计,投资成本与机组可利用率的平方成正比关系。

$$I = I_0 + \alpha \times (A - 95\%)^2 \times S = [1 + \alpha \times \Delta \times (A - 95\%)^2] \times I_0 \quad (3)$$

式中, I_0 :基准投资; S :风电设备投资, $S = \Delta \times I_0$; Δ :设备投资在投资成本中的占比,一般取40%~45%; A :风电场风机设备平均年可利用率; α :经验系数。

2)固定资产残值 V_R :固定资产残值与投资成本线性相关,即固定资产残值与机组可利用率的平方成正比关系。

$$V_R = [1 + \beta \times \Delta \times (A - 95\%)^2] \times V_{R0} \quad (4)$$

式中, V_{R0} :基准固定资产残值; β :经验系数。

3)融资成本 P :融资成本与投资成本线性相关,即融资成本与机组可利用率的平方成正比关系。

$$P = [1 + \gamma \times \Delta \times (A - 95\%)^2] \times P_0 \quad (5)$$

式中, P_0 :基准融资成本; γ :经验系数。

4)运维成本 C :海上风电的运维成本在总成本中的占比可达25%~40%,是陆上风电的2~3倍^[8,10-13]。运维成本由运行成本、维护成本和故障成本组成^[14]。运行成本包括人工费、材料费、保险费和其他费用;维护成本指日常监测维修维护费用;故障成本指故障产生故障维修费和故障损失费^[15],由于度电成本模型中已经包含发电量指标,故运维成本不再计列故障引起的上网电量损失。根据数据统计,运

维成本与机组年可利用率线性相关,关系式见公式6。

$$C = C_0 - \epsilon \times \Phi \times (A - 95\%) \times C_0 = [1 - \epsilon \times \Phi \times (A - 95\%)] \times C_0 \quad (6)$$

式中, C_0 :基准运维成本; Φ :维护成本和故障成本在运维成本中的占比,一般取60%~65%; ϵ :经验系数。

5)发电量 Y :增加风机的可利用率会改善风电场收益指标,即发电量与机组可利用率成正比关系。

$$Y = \eta \times \frac{A}{95\%} \times Y_0 \quad (7)$$

式中, Y_0 :基准发电量; η :经验系数。

经验系数取值: $\alpha = \beta = \gamma, \eta = 1$,度电成本与风电场机组平均年可利用率的关系式见公式8。

$$LCOE = \frac{I - V_R + P + C}{Y} = [1 + \alpha \times \Delta \times (A - 95\%)^2] \times (I_0 - V_{R0} + P_0) + [1 - \epsilon \times \Phi \times (A - 95\%)] \times C_0 / \frac{A}{95\%} \times Y_0 \quad (8)$$

2.4 成本—效益模型

成本—效益分析法数学模型目标函数见公式9,其物理含义是变量 A 在[95%,100%]区间范围内寻找度电成本 $LCOE$ 的最小值。

$$\frac{\partial LCOE}{\partial A} = 0 \quad (9)$$

式中: $LCOE$:度电成本,元/kW·h; A :风电场风机设备平均年可利用率,%。

3 成本—效益模型的案例分析

浙江省某海上风电装机75×4 MW风电机组,机组年利用小时2483 h,工程建设总投资54亿元,单位造价 1.8×10^4 元/kW,其中风机设备价格 7.2×10^3 元/kW,占比40%。项目运行期25年,建设工期36个月,贷款利率4.9%,贷款期限15年。项目总成本费用106亿元,其中折旧47.6亿元,利息20亿元,运维成本38.4亿元,运维成本占总成本费用的比例为36.2%。运维成本中维护成本24亿元,占运维成本的62.5%。

利用成本—效益模型,取 $\Delta = 40\%$, $\Phi = 62.5\%$,结合工程经验,采用试算手段,拟定 $\alpha = 500$, $\epsilon = 20$ 。

$$LCOE = \frac{I - V_R + P + C}{Y} = [1 + 200 \times (A - 95\%)^2] \times (I_0 - V_{R0} + P_0) + [1 - 12.5 \times (A - 95\%)] \times C_0 / \frac{A}{95\%} \times Y_0 \quad (10)$$

不考虑资金的时间成本,测算结果:当风电场风

机设备平均年可利用率为 97.15% 时,投资成本增加 9.25%,运维成本下降 26.88%,度电成本最低, $\text{LCOE}=0.5752$ 元/kW·h,运维成本占度电成本的比例为 26.7%。

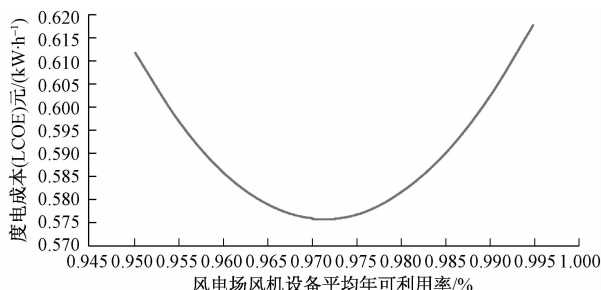


图 2 海上风电机组成本—效益分析测算结果图

根据测算结果,在不考虑政府补贴情况下,海上风电 LCOE 与浙江省标杆上网电价尚有不少的差距。从度电成本构成分析,在保证电量足额上网的前提下,工程造价和运维成本对 LCOE 的影响最为显著^[5],选择可靠性高、性价比好的风机设备,以及科学合理的运维策略是降低 LCOE 的有效手段^[16]。

4 结论和建议

1) 目前,沿海 9 省市海上风电的上网电价高于煤电标杆上网电价 0.352 8~0.479 元/kWh。随着海上风电竞价上网和平价上网政策的不断深化,对我国海上风电的发展带来深刻影响。

2) 通过成本—效益模型研究,发现运维成本与风电设备的可靠性、可利用率密切相关,风电设备的可靠性、可利用率决定了运维成本和度电成本的水平,当风电场风机设备平均年可利用率为 97.15% 时,投资成本增加 9.25%,运维成本下降 26.88%,度电成本最低为 0.575 2 元/kW·h。

3) 在实际工程应用中,建议重点研究成本—效益模型中各类经验系数选取的科学性和准确性,提高模型的精确度和实用性,为我国海上风电项目的建设和运维提供科学手段和技术保证。

参考文献

- [1] 迟永宁,梁伟,张占奎,李琰,等.大规模海上风电输电与并网关键技术研究综述[J].中国电机工程学报,2016,36(14):3758—3771.
- [2] 张继立,王益群,吕鹏远.我国海上风电区域开发方案浅析[J].风能,2018(6):62—68.
- [3] WALTER SHORT, DANIEL J. PACKKEY, THOMAS HOLT. A manual for the economic evaluation of energy efficiency and renewable energy technologies[Z]. National Renewable Energy Laboratory(U. S.), 1995.
- [4] FRAUNHOFER ISE. Levelized cost of electricity renewable energy technologies study[R]. 2006.
- [5] 王瑜. 基于 LCOE 方法的中国风电成本研究[D]. 北京:华北电力大学,2017.
- [6] 张全斌. 运用度电成本理论剖析光电项目投资机遇[J]. 浙江电力,2017,36(4):9—13,26.
- [7] 钟舒雅. 海上风电场的运营维护优化研究[D]. 上海:上海大学,2016.
- [8] 黄玲玲,曹家麟,张开华,等. 海上风电机组运行维护现状研究与展望[J]. 中国电机工程学报,2016,36(3):729—738.
- [9] 桑祺,何焱,冯笑丹,等. 面向组合维修的海上风电场运行维护建模及仿真[J]. 电力系统自动化,2016,40(20):83—91.
- [10] 刘涛. 风电行业弃风、装机及运维大预测[J]. 能源,2019(2):71—75.
- [11] RADEMAKERS L W M M, BRAAM H, OBDAM T S, et al. Operation and maintenance cost estimator (OMCE) to estimate the future O & M costs of offshore wind farms [C]. European Offshore Wind Conference, September 14—16, 2009, Stockholm, Sweden; 3—12.
- [12] MARTIN R, LAZAKIS I, BARBOUCHI S, et al. Sensitivity analysis of offshore wind farm operation and maintenance cost and availability[J]. Renewable Energy, 2016, 85:1226—1236.
- [13] 郭慧东,王玮,夏明超. 海上风电机组维修排程在线多目标决策模型[J]. 中国电机工程学报,2017,37(7):1993—2001.
- [14] 辛悦. 风力发电项目成本核算研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.
- [15] 刘喜梅,白恺,邓春,等. 大型风电项目平准化成本模型研究[J]. 可再生能源,2016,34(12):1853—1858.
- [16] 赵立宇. 风电企业盈利能力提升的研究[D]. 北京:华北电力大学,2016.

Reliability Research of Offshore Wind Power Based on Grid Parity

ZHOU Qiong-fang¹, ZHANG Quan-bin²

(1. Zhejiang Electric Power Design Institute Company Ltd., Hangzhou 310012, China;

2. Zhejiang Provincial Energy Group Company Ltd., Hangzhou 311121, China)

Abstract: The offshore wind power is the most valuable renewable energy for large-scale development. The total capacity of offshore wind power will be expected to exceed 8.5 GW by 2020 in China. The cost of operation & maintenance accounts for 25%~40% of levelized cost of electricity (LCOE). The government promotes the wind power grid parity since 2019, which will be far-reaching effects on the development of offshore wind power. Based on the analysis of LCOE, a cost-benefit model is established. It is found that the reliability and availability of wind power equipment determines the level of the cost of operation & maintenance and LCOE. Based on the cost-benefit model, the lowest LCOE of one offshore wind power project is 0.5752 RMB/kW.h when the availability of wind power equipment is 97.15%, which the cost of operation & maintenance decreased by 26.88%.

Key words: offshore wind power; grid parity; levelized cost of electricity (LCOE); reliability; availability

(上接第 68 页)

Research on the Layout of Leisure Places in Urumqi Based on POI Data

LI Hong-yan¹, CHEN Xue-gang^{1,2}, HU Jiang-ling¹

(1. School of Geographic Sciences and Tourism; 2. Silk Road Economic Belt Urban Development

Research Center, Xinjiang Normal University, Urumqi 830054, China)

Abstract: With the development of society and the improvement of living standards, leisure has become an important part of people's daily life. This article takes Urumqi as the research area, according to the definition of leisure POI data, The spatial distribution characteristics and correlations of leisure-type geographic entities in the study area are measured by nuclear density analysis techniques and nearest neighbor indices. The results show that the leisure POI is in a state of agglomeration, and the agglomeration effect of the living rest POI is the strongest. The clustering effect of POI in tourism and leisure is the weakest and relatively scattered; the NNI index of various POIs is not directly related to its quantity, The main reason for the small NNI value is that the POI is concentrated in the central area of the city; According to the nuclear density index, the leisure POI presents a "large center and multi-dispersion" distribution pattern; The distribution characteristics of life service POI are closest to the whole, The spatial distribution of tourism and leisure POI presents a "multi-center" situation.

Key words: POI; nuclear density analysis; nearest neighbor index; geographic information technology; Urumqi