



基于 $LCOE$ 的海外光伏项目投标策略的分析

王 东^{*}, 叶冬挺, 滕晓峰

(上海电气电站工程公司, 上海 201199)

摘 要: 越来越多的中国 EPC 承包商将目光投向了国际光伏市场, 因此需要适应国际光伏市场中光伏电站以平准化度电成本 (LCOE) 为指导原则来制定投标策略的投标方式。光伏电站的担保发电量和 EPC 成本对 $LCOE$ 的影响很大, 高风险的担保发电量有可能产生性能罚款。从性能罚款及 EPC 成本最低的角度, 分析以最小代价降低 $LCOE$ 的投标策略。结果显示, 在合理的成本和风险边界内, $LCOE$ 最低的策略就是最佳投标策略。

关键词: 海外光伏项目; $LCOE$; 性能罚款; EPC 成本; 投标策略

中图分类号: TK513.5

文献标志码: A

0 引言

根据 2020 年 1 月 11 日国际可再生能源署 (IRENA) 发布的《10 years: Progress to Action》显示, 过去 10 年, 可再生能源的投资额达到 3 万亿美元, 2019 年可再生能源已经占据全球电力来源的 26%, 光伏发电的度电成本约为 5.2 美分/kWh^[1]。2019 年, 在所有新近投产的并网的大规模可再生能源发电中, 有 56% 的可再生能源发电的度电成本都低于最便宜的化石燃料发电的度电成本; 10 年间, 光伏发电的度电成本下降了 82%^[2]。

光伏组件及配套系统的成本的降低, 促使 2019 年全球光伏装机容量占全球电力新增装机容量的 48%, 但光伏发电系统的发电量仅占全球电力输出的 2.6%^[3]。中国是全球最大的光伏市场, 2019 年, 吉林、黑龙江、四川、青海、西藏、内蒙古等省 (区) 的光伏发电度电成本已低于其各自的燃煤标杆电价; 国内光伏电站的平均造价约为 4.3 元/W^[4]。

以往在光伏项目的开发过程中, 国内工程总承包 (EPC) 承包商只重视初始 EPC 成本, 不太了解甚至忽视光伏发电的度电成本。随着国内 EPC 承包商越来越多的参与到全球光伏项目的

开发中, 其必须要适应国际规则, 从平准化度电成本 (Levelized Cost of Energy, LCOE) 的角度来进行光伏电站的设计, 光伏电站的担保发电量和 EPC 成本对 $LCOE$ 的影响很大, 高风险的担保发电量有可能产生性能罚款。本文从性能罚款及 EPC 成本最低的角度, 以 $LCOE$ 为评标原则, 分析海外光伏项目的投标策略。

1 $LCOE$ 的介绍

从全球范围来看, 光伏电站开发商评估项目可行性的核心指标是 $LCOE$, $LCOE$ 也是签署购电协议的依据。 $LCOE$ 的本质就是全生命周期内总收入的净现值等于总成本的净现值^[5], 并且基于 2 个基本假设: 折现率和电价在全生命周期内稳定^[6]。常见的计算方法可参考美国 Sunpower 公司于 2008 年发布的算法^[7], 其公式为:

$$LCOE = \frac{TLCC}{TLEP} \quad (1)$$

式中, $TLCC$ 为全生命周期内的总成本, 包括建设成本和运维成本; $TLEP$ 为全生命周期内的总发电量。

将式 (1) 进一步展开可得到式 (2):

收稿日期: 2020-06-23

通信作者: 王东 (1984—), 男, 研究生、工程师, 主要从事新能源项目的 EPC 开发方面的工作。whuwangdong@163.com



$$LCOE = \frac{INVT - \sum_{n=1}^N \frac{Dep^n}{(1+DR)^n} TR - \frac{RV}{(1+DR)^N} + \sum_{n=1}^N \frac{AC^n}{(1+DR)^n} (1-TR)}{\sum_{n=1}^N \frac{IEP(1-SDR)^n}{(1+DR)^n}} \quad (2)$$

式中, $INVT$ 为初始投资, 即项目的动态投资或建设成本, 包含 EPC 成本和建设期利息; Dep 为全生命周期内因折旧导致的税费减免的现值; RV 为固定资产残值的现值, 即全生命周期内未消耗掉的建设成本; AC 为全生命周期内项目运营成本的现值, 运营成本包括运维成本和财务成本; IEP 为第零年的担保发电量, 此发电量是被购买的发电量或允许上网的发电量, 也是 EPC 承包商担保的发电量; SDR 为光伏发电系统的衰减率, 一般是指光伏组件的衰减率; DR 为折现率; TR 为所得税的税率; N 为运营期。

通过上述公式可以发现, $LCOE$ 主要由 EPC 成本、运维成本和担保发电量这些参数决定。其中, EPC 成本可由直流装机容量与光伏电站的单位造价的乘积表示, 运维成本为运营成本与财务成本相加的和, 担保发电量为直流装机容量与光伏组件最佳倾角时的发电小时数及系统效率这三者的乘积。

EPC 成本和担保发电量由 EPC 承包商的方案决定, 运维成本由运维服务商的运维管理水平决定。在同一运维水平下, $LCOE$ 可体现光伏电站的成本和性能水平, 实质上反映了 EPC 承包商提供光伏电站 EPC 解决方案的能力。因此可用 $LCOE$ 来比较不同 EPC 方案的优劣, 以此来反映各方案的竞争力^[8]。

2 $LCOE$ 在光伏项目 EPC 投标中的应用

2.1 基本假设及主要影响因素

本文以某海外光伏项目 EPC 投标为例, 分析光伏项目的 EPC 成本构成, 以及 $LCOE$ 的主要影响因素。此项目位于中亚地区, 项目所在地的海拔高度约为 312 m, 项目的直流装机容量为 131.5 MW_p、交流装机容量为 115.2 MW, 项

目的容配比为 1.14。采用 400 W_p 的单晶硅光伏组件、平单轴光伏跟踪支架、集中式逆变器, 由 220 kV 架空线将光伏电力送出。

本文分析时采用的计算 $LCOE$ 的基本输入条件如表 1 所示, 其中, 运维单价、铺底流动资金单价、税率、贷款比例、利率等财务输入条件是参考国内光伏项目后所做的假设 (因 IPP 开发商未披露项目财务数据)。

表 1 计算 $LCOE$ 的基本输入条件

Table 1 Basic input data when calculating $LCOE$

参数	数值
直流装机容量 /MW _p	131.5
运营期 /a	25
建设期 /a	1
光伏组件最佳倾角时的发电小时数 /h	2461.4
系统效率 PR/%	86.42
第零年的担保发电量 / 万 kWh	27972
光伏电站的单位造价 / 美元 · W _p ⁻¹	0.595
EPC 成本 / 万美元	7821
铺底流动资金单价 / 美元 · MW ⁻¹	3000
运维单价 / 美元 · MW ⁻¹	5000
贷款比例 /%	80
长期贷款利率 /%	4.9
流动资金贷款利率 /%	4.35
偿还年限 /a	10
折旧年限 /a	10
固定资产残值 /%	5
设备增值税率 /%	13
建安增值税率 /%	11
所得税率 /%	25
通货膨胀率 /%	3
折现率 /%	6

根据表 1 中的输入条件, 可计算出本项目的 $LCOE$ 约为 2.6 美分 /kWh, 其中运营成本的贡献

率约为 14.6%，财务成本的贡献率约为 14.7%。
EPC 成本、运维成本和担保发电量这 3 个变量对 $LCOE$ 的敏感性分析如图 1 所示。

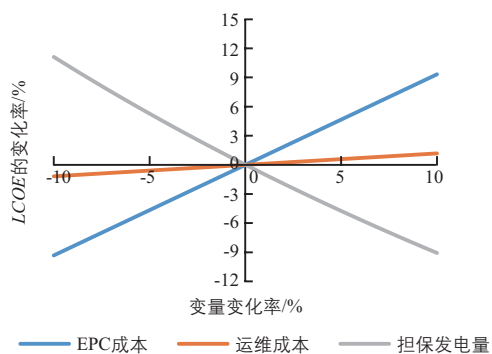


图 1 $LCOE$ 单变量的敏感性分析

Fig. 1 Univariate sensitivity analysis of $LCOE$

由图 1 可知, 担保发电量和 EPC 成本对 $LCOE$ 的影响基本一样, 运维成本对 $LCOE$ 的影响非常小。当担保发电量和 EPC 成本的变化率均为负值时, 担保发电量的影响稍大; 这二者的变化率均为正值时, EPC 成本的影响稍大。由于光伏电站的融资和运营由业主负责, 所以对于 EPC 承包商而言, 应重点优化担保发电量和 EPC 成本。

下文对 EPC 成本和担保发电量同时变化时 $LCOE$ 的变化情况进行分析。此处引入 $LCOE_{rate}$ 的定义, 其可表示为:

$$LCOE_{rate} = \frac{LCOE' - LCOE_0}{LCOE_0} \quad (3)$$

式中, $LCOE'$ 为当 EPC 成本和担保发电量同时变化时得出的新度电成本; $LCOE_0$ 为当 EPC 成本和担保发电量为初始值时得出的度电成本。

EPC 成本和担保发电量同时变化时的 $LCOE_{rate}$ 情况如图 2 所示, 图中蓝色区域和橙色区域分界线处 $LCOE_{rate}$ 为零, 此时表达式为:

$$y = 0.9257x \quad (4)$$

式中, x 为 EPC 成本的变化率; y 为担保发电量的变化率。

图 2 中, 在 $LCOE_{rate}$ 为零时所形成的斜线的左上方区域, $LCOE_{rate}$ 为负值, 这说明 $LCOE'$ 相比 $LCOE_0$ 降低了; 在 $LCOE_{rate}$ 为零时所形成的斜线的右下方区域, $LCOE_{rate}$ 为正值, 这说明

$LCOE'$ 相比 $LCOE_0$ 增加了。当改变表 1 中的基本输入条件时, 式 (4) 仍然成立, 图 2 的形状不发生改变。

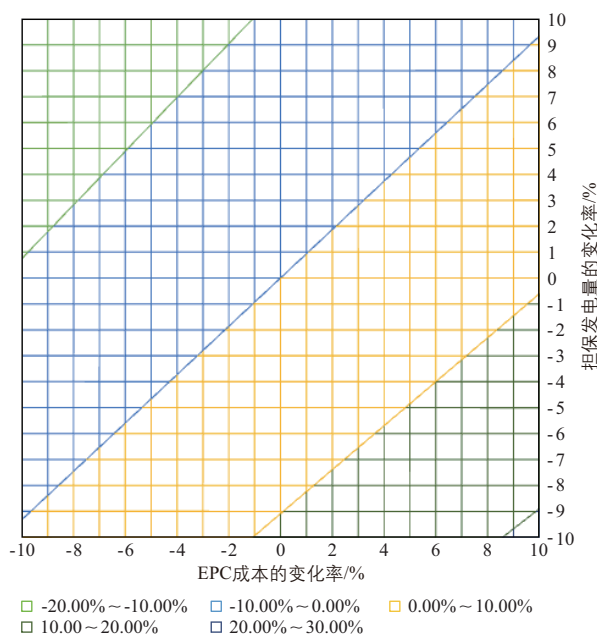


图 2 EPC 成本变化率和担保发电量变化率对 $LCOE_{rate}$ 的影响

Fig. 2 Impact of EPC cost change rate and guaranteed power generation change rate on $LCOE_{rate}$

只要将 EPC 成本的变化率和担保发电量的变化率从 (0,0) 点往图 2 中 $LCOE_{rate}$ 为零时所形成的斜线的左上方区域移动, 即可降低 $LCOE$ 。但对于同一个 $LCOE$ 目标值, 其对应的 EPC 成本的变化率和担保发电量的变化率不是唯一的, 而是有无数种组合。

2.2 $LCOE$ 的优化策略

假设方案优化的目标是使 $LCOE$ 降低 5%, 此时 x 和 y 的关系可以拟合为:

$$y = 0.9841x + 0.0514, R^2 = 0.9998 \quad (5)$$

为求解出最优的担保发电量和 EPC 成本组合, 引入 $LCOE_{value}$ 指标来衡量 $LCOE$ 每变化 1 个百分点时付出的总成本。 $LCOE_{value}$ 可表示为:

$$LCOE_{value} = \frac{C_{performance} + C_{epc}}{100LCOE_{rate}} \quad (6)$$

式中, $C_{performance}$ 为性能罚款; C_{epc} 为 EPC 成本变化量。

$$C_{\text{performance}} = AEP \cdot P \cdot y \cdot N \quad (7)$$

式中, AEP 为年均担保发电量, 万 kWh; P 为不含税上网电价, 美分 /kWh。

$$C_{\text{epc}} = CAPX \cdot x \quad (8)$$

式中, $CAPX$ 为 EPC 成本, 万美元。

根据式 (6)~式 (8), 可建立 $LCOE_{\text{value}}$ 的最小值目标函数, 即:

$$\min(LCOE_{\text{value}}) = \frac{AEP \cdot P \cdot y \cdot N + CAPX \cdot x}{100 LCOE_{\text{rate}}} \quad (9)$$

式 (9) 中, AEP 取 26131 万 kWh; P 取 2.68 美分 /kWh; $y=0.9841x+0.0514$, 其中, $x \in [-0.15, 0.15]$ 、 $y \in [0, 0.02]$; N 取 25 年; $CAPX$ 取 7821 万美元; $LCOE_{\text{rate}}$ 取 5%。

将性能罚款的上限设为 EPC 成本的 20%, 则 $AEP \cdot P \cdot y \cdot N \leq 0.2CAPX$ 。

采用非线性 GPR 方法求解式 (9), 可得最优解 $x=-0.052$ 、 $y=0$ 、 $LCOE_{\text{value}}=81.7$ 万美元。即 EPC 成本降低 5.2%, 担保发电量不变时, $LCOE$ 降低 1 个百分点需要付出 81.7 万美元, 也意味着需要多投入的总成本是 408.6 万美元。

2.3 装机容量对 LCOE 的影响

光伏电站的直流装机容量 (光伏组件的总容量) 会同时影响 EPC 成本和担保发电量, 一般情况下这种影响是正相关。但由于场地和逆变器性能的限制, 且项目标书规定了项目的直流装机容量和交流装机容量的范围, 因此直流装机容量不可能无限大或达到最佳容配比。

本文案例中的 EPC 成本构成如图 3 所示, 其中, 光伏组件成本约占 EPC 成本的 45%。

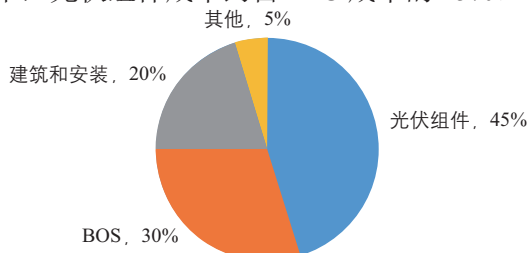


图 3 EPC 成本的构成

Fig. 3 EPC cost structure

本项目业主指定了光伏组件装机容量和交

流装机容量的范围, 受场地限制, 最多可在容许的直流装机容量范围内多布置 1% 的光伏组件, 此时容配比为 1.15, EPC 成本约增加 0.45%。由于存在弃光现象, 项目的实际发电量仅增加了 0.8%。由式 (5) 计算可知, EPC 成本在原来的基础上降低 4.4% 即可使 $LCOE$ 降低 5%, 此时总共需要降低的 EPC 成本是 $4.4\%+0.45\%=4.85\%$, 约 379.3 万美元, 则 $LCOE_{\text{value}}$ 为 75.86 万美元。

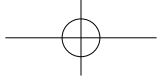
上述分析是在场址受限的情况下进行的分析, 实际分析过程中可根据投标竞争的形势来确定优化的 $LCOE$ 目标, 然后以最小的成本实现此目标。

3 结论

由于 $LCOE$ 是衡量 EPC 方案的最佳指标, 本文以海外某光伏项目为例, 分析了影响 $LCOE$ 的因素, 以便于得到最优 $LCOE$, 以更好地进行光伏项目投标。分析结果显示, 担保发电量、EPC 成本对光伏电站 $LCOE$ 的影响较大, 运维成本对 $LCOE$ 的影响非常小。在场地和标书要求的限制条件下, 尽可能使容配比接近最佳容配比, 从而以较低的综合成本降低 $LCOE$ 。在海外光伏电站投标过程中, 最好结合性能罚款的要求, 采取合适的性能和成本策略, 从而提升 EPC 方案的竞争力。

【参考文献】

- [1] IRENA. 10 Years: Progress to Action[R/OL]. (2020-01-11). https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jan/IRENA_10_years_2020.pdf.
- [2] IRENA. Renewable power generation costs in 2019[R/OL]. (2020-06). https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2020/Jun/IRENA_Power_Generation_Costs_2019.pdf.
- [3] SolarPower Europe. Global Market Outlook for Solar Power(2020-2024)[R/OL]. (2020-06-15). <https://www.solarpowereurope.org/global-market-outlook-2020-2024/>.
- [4] 陈宁. 光伏发电度电成本测算与分析 [EB/OL]. (2020-06-02). <http://guangfu.bjx.com.cn/news/20200602/1077807.shtml>.
- [5] 孙建梅, 陈璐. 基于 LCOE 的分布式光伏发电并网效益分析 [J]. 中国电力, 2018, 51(3): 88 - 93.



- [6] 潘彬彬, 陈祉好, 贾楠菲, 等. 关于光伏发电成本核算问题的研究 [J]. 价格理论与实践, 2019(5): 138 – 140, 144.
- [7] CAMPBELL M, ASCHENBRENNER P, BLUNDEN J, et al. The drivers of the levelized cost of electricity for utility-scale photovoltaics[EB/OL]. (2008-08-14). https://www.researchgate.net/publication/285225361_The_drivers_of_the_levelized_cost_of_electricity_for_utility-scale_photovoltaics.
- [8] 李宜真. *LCOE* 与 *IRR* 指标对比及使用场景分析 [J]. 风能, 2019(12): 58 – 61.

ANALYSIS OF BIDDING STRATEGIES FOR OVERSEAS PV PROJECT BASED ON *LCOE*

Wang Dong, Ye Dongting, Teng Xiaofeng

(Shanghai Electric Power Generation Engineering Co., Shanghai 201199, China)

Abstract: More and more Chinese EPC contractors are paying attention on the international PV market. Therefore, it is necessary to issue a bidding strategy based on *LCOE* as a guiding principle to adapt to the international PV market. The power generation and the cost of EPC have a great impact on *LCOE*. A guaranteed power generation with high risk will probably lead to a performance penalty. This paper analyzes the bidding strategies to achieve the lowest *LCOE* from the perspective of the lowest total performance penalty and EPC cost. The results show that, the strategy with the lowest *LCOE* is the best bidding strategy within a reasonable cost and risk boundary.

Keywords: overseas PV project; *LCOE*; performance penalty; EPC cost; bidding strategy