

风电项目度电投资管控优化路径探索

杨 野

国家电投集团广西电力有限公司 广西南宁 530000

摘 要：随着能源革命的不断深入以及“双碳”目标的实现，我国风电产业已经全面进入平价上网甚至低价上网的新时期。在电价红利消退、用地政策趋紧、原材料价格波动加剧的多重制约之下，传统的以“单位千瓦造价”为核心的成本控制模式已经不能满足高质量发展的需要了。本文提出以度电投资为核心指标的全生命周期管控理念，即分子端（投资成本）的精益控制和分母端（发电量）的深度挖掘，从而达到项目经济效益最大化的目的。本文从微观选址与资源精准评估、大兆瓦机组与定制化塔架技术应用、集约化工程建设与供应链管理、数字化运维与后评价机制四个方面，系统构建出风电项目度电投资管控的优化路径。通过对典型案例的数据对比分析得出技术降本和管理增效协同的效果，给风电企业于复杂市场环境下提高核心竞争力提供理论依据和借鉴。

关键词：风电项目；度电投资；成本管控

引言

风能属于技术最成熟、开发潜力最大的可再生能源之一，在创建新型电力系统时起着举足轻重的作用。近些年来，由于技术的革新以及产业链的完备，风电开发成本明显降低，但也遭遇了资源富集区开发殆尽、平价上网倒逼收益率收窄、非技术成本占比提升等严峻考验。在竞价配置资源的行业背景之下，怎样在保证项目全生命周期安全可靠的前提下，用科学的方法降低投资、提高发电效能，成为风电投资企业生存与发展的关键问题^[1]。

1 风电项目度电投资的内涵解析与影响因素

1.1 度电投资的经济学逻辑与评价维度

度电投资是反映风电项目投资效益的综合指标，核心就是寻求性价比的最佳平衡。从数学公式上看，度电投资就是项目总投资除以全生命周期上网电量。降低该指标需要在分子端（总投资）做减法，在分母端（发电量）做加法^[2]。但不是简单的加减，是复杂的系统工程耦合。选用更高的轮毂高度塔架，虽然钢材消耗、基础造价增加（分子增大），但是若能捕获到更多的切变更大的高空风能，从而带来发电量的大幅提升（分母大幅增加），则最终的度电投资是降低的。反之，为了节省征地费用而将机位布置在湍流强度大但是风速稍低的区域，虽然可以减少前期投入，但是会导致机组故障率增加、发电量下降，最终推高度电投资^[3]。因此度电投资的评价维度要建立在技术、经济一体化的基础上，重视设计

方案、设备选型、施工组织和资源环境的最优匹配，它是检验风电项目是否具有抗风险能力、长期盈利能力的试金石^[4]。

1.2 影响度电投资的关键敏感性因子分析

风电项目度电投资的影响因素十分复杂，大体可以分为资源禀赋、技术方案、工程造价、非技术成本四大类。风资源禀赋是最决定性的因素，即使微小的变化也会给发电量带来指数的变化，从而直接影响分母的大小。其次机组选型及布置方案影响着捕风效率和尾流损耗，大兆瓦机组的应用可以摊薄单位千瓦的征地、基础、集电线路成本，是目前降低度电投资的主要技术手段。工程造价受大宗商品（钢材、水泥、铜）价格的波动、人工成本、施工工期等影响很大，供应链的议价能力、施工管理的精细化程度直接影响初始投资的边界。最后不能忽视的是非技术成本，土地征收补偿费、水土保持及环境保护费、路条获取及前期开发费用等，近几年来刚性上涨，具有很强的地域性、政策不确定性，成为目前风电投资管控中的“黑天鹅”因素，对度电投资的敏感性影响越来越大^[5]。

2 源头控制：精细化微观选址与资源评估优化

2.1 基于多源数据融合的风资源精准评估技术

风电项目全生命周期中，前期风资源评价、微观选址属于决定度电投资水平的“先天基因”。传统的选址大多依靠少量的测风塔数据以及中尺度气象数据，存在样本代表性不够、地形拟合误差大的问题。为了达到度电投资最优化的目的，就必须使用多源数据融合的精准确评

价技术。这就意味着要综合使用长时间序列的卫星遥感数据、高密度的测风塔实测数据、激光雷达流动测风数据、高精度的地形地貌测绘数据。用CFD(计算流体力学)软件对复杂地形的流场进行模拟,不再是简单的线性外推,而要对风切变、湍流强度、入流角、极端风况等对机组出力的影响做详细的分析。

2.2 迭代式微观选址与机位排布的经济性寻优

微观选址不但是技术问题,也是经济账。在确定风资源分布图谱之后,就要进行多轮次的迭代式选址、排布优化,从而找到发电量和建设成本的最佳平衡点。设计人员要打破常规的满铺思维,转而使用经济寻优的方法。具体而言,在选址软件中输入详细的道路建设成本模型、集电线路走向成本模型和土地征收成本模型。风速最好的机位距离主道路过远,需要修建长距离的进场道路,土石方工程量大,或者该机位处于生态红线边缘,审批风险和环保投入大,综合计算下来,度电投资远高于风速稍低但施工方便的机位。因此,优化路径需要采用自动化寻优算法,在微观选址阶段将风电场的发电收益和风电场道路、线路、基础、征地等成本耦合在一起计算,剔除掉那些机位度电成本过高的机位,调整机位坐标,改善尾流控制策略,使得整个风电场系统的度电投资最低,而不能只追求单机发电量的最大。

3 技术降本:大兆瓦机组与定制化塔架的应用

3.1 大兆瓦机组应用对BOP成本的摊薄效应

风电机组大型化是目前风电行业降低度电投资最直接、最有效的技术途径。随着材料科学和控制技术的发展,单机容量从早期的1.5MW、2.0MW发展到现在的5.0MW、6.0MW甚至更大。大兆瓦机组的使用会使得平衡电站的成本产生摊薄的效果。在总装机容量不变的情况下,使用大兆瓦机组会使得机位数量大大减少。机位数量减少直接导致塔筒基础数量减少、场内道路修建长度缩短、集电线路电缆用量减少、征地面积节约。100MW风电场用2MW机组需要50个机位,用5MW机组只需要20个机位,由此带来的基础工程、吊装工程、道路工程的造价降低幅度可达20%以上。同时大兆瓦机组一般装有较长的叶片,扫风面积的增加幅度往往大于额定功率的增加幅度,使机组在低风速段的捕风能力更强,利用小时数大幅提高。减分子、加分母的双向调节作用使大兆瓦机组成为降低度电投资的关键手段。

3.2 柔性塔架与混塔技术在低风速区的适用性分析

我国风电开发重心逐渐向中东南部低风速地区转移,这些区域普遍存在风切变大、近地层风速低的特点。为

了获得更高处的优质风能,高塔架技术随之产生。传统的全钢制柔性塔架和新型钢混塔架(混凝土段+钢塔段)成为了降低度电投资的重要选择。虽然高塔架直接增加了塔筒的制造成本和吊装难度,但是它带来的发电量增益一般会超过这部分新增投入。度电投资控制要针对具体项目的风切变系数做敏感性分析。如果风切变系数较高,每增加10米高度带来的风速提升能明显增加年满发小时数,那么采用140米或者160米的钢混塔架就是经济的。钢混塔架刚度大、运输限制小(混凝土段可预制拼装)、抗疲劳性能好,适合平原低风速地区。通过高塔架、长叶片的组合拳,把原来没有开发价值的低风速资源变成优质的资产。优化路径就是准确计算塔架高度增加带来的边际成本和边际发电收益,找到使度电投资最低的“黄金高度”。

4 过程管控:集约化建设与供应链协同管理

4.1 复杂地形下的道路与集电线路优化设计

风电项目建设的成本中,场内道路、集电线路往往占有较大的比重,在山地风电项目中这两项成本甚至比风机基础造价还要高。因此道路和集电线路的集约化设计就是施工阶段控制度电投资的关键。传统的道路设计只考虑运输要求,没有对土石方平衡和路径最短化进行深入的考虑。优化路径要采用三维数字化设计平台,结合高精度地形图,对道路选线做自动寻优。在保证大件运输车辆转弯半径、最大爬坡度的基础上,尽可能利用现有的乡村道路进行改造,减少新建道路的长度;通过土石方的合理调配,尽量达到挖填平衡,减少弃渣场的设置及防护工程的投入。集电线路方面应该推广路径短、损耗小的复用路径设计,使集电线路尽量沿检修道路敷设,减少林地征用和施工便道的开挖。另外根据电缆载流量和压降校验来合理截断、优化电缆截面,避免大马拉小车式的冗余设计,每一公里都要精打细算,压降辅助工程造价,从而降低整体度电投资。

4.2 供应链价格波动应对与采购策略创新

风电项目建设周期长,设备材料种类繁多,受大宗商品价格波动影响大。钢材价格影响塔筒、钢筋成本,铜价影响电缆、发电机成本,波动都会直接传导到度电投资上。为了降低市场风险,必须创新供应链采购策略。一方面要建立集团级的主机及主要设备框架采购机制,以规模优势换取低价,锁定优质产能和基础价格;另一方面要探索同核心供应商建立风险共担、利益共享的长期战略合作伙伴关系,采用价格联动机制,即在合同中约定主要原材料价格波动超过一定幅度时,对设备价格

进行动态调整，防止供应商因为成本倒挂而违约或者降低质量。另外，非核心部件及施工辅材的采购实行电子超市化采购、区域集中配送，减少中间环节和物流成本。根据市场行情的敏锐判断，灵活运用期货套期保值等金融手段，对铜、钢材等原材料实施成本锁定，把市场波动给项目造价带来的影响降到最低，保证度电投资处在预期的范围之内。

5 实证分析：某山地风电项目优化前后的经济性对比

为了检验上述优化路径的有效性，本文选取南方某典型山地风电项目做实证对比分析。该项目规划容量100MW，位于复杂的山地，风资源有明显的切变特性。

5.1 案例项目概况与优化方案设定

项目初始方案（方案A）用的是传统的2.5MW机组，轮毂高度90米，共布置40台机组，道路设计在山脊线上迂回大范围。优化方案（方案B）按照度电投资控制的理念对风资源图谱进行了全方位的重新构建，去除了5个湍流高、风速低的机位；机组选型升级为5.0MW大兆瓦机组，轮毂高度提升到110米，机位数量减少到20台；道路设计上采用了大坡度运输车方案，缩短了道路长度；集电线路路径上进行了优化。

5.2 经济技术指标对比分析

通过对方案A和方案B进行详细的概算编制和发电量模拟计算，得出如下关键指标对比表：

表1 某山地风电项目优化前后关键指标对比分析表

指标项目	单位	初始方案 (A)	优化方案 (B)	变动幅度	备注
装机容量	MW	100	100	0%	容量保持一致
单机容量	MW	2.5	5.0	+100%	机组大型化
机位数量	台	40	20	-50%	机位减半
静态总投资	万元	72,000	65,000	-9.7%	征地、道路、线路节省显著
单位千瓦造价	元/kW	7,200	6,500	-9.7%	造价明显降低
年上网电量	万kWh	23,000	25,500	+10.8%	高塔架+大叶片提升效率
年等效满发小时	h	2,300	2,550	+10.8%	资源利用率提高
度电投资	元/kWh	0.157	0.127	-18.5%	核心指标显著优化
资本金内部收益率	%	8.5%	12.2%	+3.7pct	盈利能力大幅提升

从表1可以看出，通过机组大型化、微观选址优化、工程集约化设计，优化方案B单台风机设备采购成本增加，但是由于机位数量减半，征地费用、场内道路、集电线路、风机基础等BOP成本大幅降低，静态总投资降低9.7%。更重要的是由于高塔架、精准选址，年上网电量提高了10.8%。分子变小、分母变大，核心指标“度电投资”由原来的0.157元/kWh降低到现在的0.127元/kWh，降低了19.1%。直接导致项目资本金内部收益率大幅提高，使平价上网时代具有很强的市场竞争力。该实证分析很好地证明了全生命周期度电投资控制策略的科学性、有效性。

结论

风电产业步入平价、竞价并存的新发展阶段，度电投资成了评判项目投资价值和核心竞争力的“金标准”。本文经由理论剖析并加以实证研究，得出了风电项目度

电投资管控的系统性改良途径。研究表明，单纯依靠降低设备采购价格的粗放式管理已经触及天花板，未来降本增效必须向技术创新和精细化管理要效益。

参考文献

- [1] 孙冰, 赛宝勒格, 苏德. 风电项目全过程造价管控策略分析[J]. 中国电力企业管理, 2025(21): 66-67.
- [2] 赵振宇, 解冰清. 多渗透率场景下的风电系统平准化度电成本分析[J]. 现代电力, 2024, 41(6): 1148-1155.
- [3] 李悦. 基于新型电力系统的海上风电配套建设预算投资优化研究[J]. 电气应用, 2025, 44(7): 112-117.
- [4] 顾伟伟, 贺广零, 胡志祥, 等. 工业园区微电网项目中风电与光伏发电的容量配置及推广策略研究[J]. 太阳能, 2024(5): 42-51.
- [5] 洪子鑫, 王梦川, 李峰, 等. 平价时代的海上风电项目投资建议[J]. 中国市场, 2024(32): 62-65.