

新能源风电低风速资源开发技术

冯 帆

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司 湖南 长沙 410014

摘 要：本文聚焦年均风速 4.5-6.0m/s 的低风速风电资源，梳理其时空分布与波动特性，阐述精细化资源评估体系，涵盖实测、数值模拟及大数据优化技术。系统剖析低风速专用机组优化、电场选址、运行控制与并网适配等核心关键技术，结合中东部工程案例验证技术成效，分析项目经济与环保效益，点明产业现存短板，并预判智能化、风光储协同的规模化发展趋势。

关键词：新能源风电；低风速资源；开发技术

引言：我国风电优质高风速资源开发日趋饱和，中东部、南方广泛分布的低风速资源成为风电扩容、完善新能源布局的核心潜力领域。低风速风能密度低、风速波动大、尾流干扰显著，传统风电技术适配性不足。为破解低风速资源开发瓶颈，本文系统梳理资源特性、精准评估方法与核心开发技术，结合工程实践总结应用经验，剖析产业现存问题，为低风速风电规模化、高效化、平价化开发提供技术参考。

1 低风速风电资源特性与精细化评估技术

1.1 低风速风电资源界定与分布特征

(1) 低风速资源行业界定标准，年均风速 4.5-6.0m/s 核心区间划分。低风速资源指年均风速 4.5~6.0m/s 的风能，按 4.5~5.0、5.0~5.5、5.5~6.0m/s 分为下限区、中低风速区和上限区，划分依据风机切入与额定风速的工程适配性。(2) 我国低风速资源地域分布特点，中东部、南方地区资源禀赋规律。资源集中于中东部及南方，涵盖豫、皖、鄂、湘、赣、川、滇等省，呈“北南递减、东西递增”格局。豫中东部、皖北及鄂中年均风速多 5.0~6.0m/s，属相对富集区；湘南、赣中南部及两广丘陵多为 4.5~5.5m/s，资源较破碎^[1]。(3) 低风速资源时序特性，风速波动、湍流强度、风切变特征。风速冬春季较大、夏秋季偏小，午后至傍晚较大、夜间至清晨较小。湍流强度普遍偏高，复杂地形下可达 0.20~0.30。风切变指数变化范围 0.15~0.40，对轮毂高度选取影响显著。

1.2 低风速资源常规评估方法

(1) 实测数据评估法，测风塔数据采集、整理与风速参数核算。测风塔高度不低于 100m，分层安装传感器并连续采集不少于完整一年数据，经不合理

数据剔除、缺测插补及长期订正后保证数据完整率达 90% 以上，重点核算年平均风速、风功率密度、湍流强度、风切变指数及威布尔分布参数等关键指标。(2) 数值模拟评估法，WRF 模式、CFD 仿真在风资源评估中的应用。WRF 中尺度模式可实现 1~10km 分辨率区域风场模拟，反映资源宏观分布规律；CFD 仿真基于 N-S 方程求解，在复杂地形下可实现 50~200m 高分辨率流场模拟，精确刻画局地加速效应，两者嵌套形成“中尺度驱动+微尺度精细诊断”的评估技术体系。(3) 卫星遥感数据辅助评估技术及适用场景。散射计风场反演数据和 SAR 合成孔径雷达数据适用于近海、平原普查及沿海岛屿等测风塔稀疏区域，前者分辨率 12.5~25km，后者可达百米级，但与再分析资料融合可构建长序列数据集，有效弥补地面观测不足^[2]。

1.3 低风速资源精细化评估优化技术

(1) 复杂地形下低风速资源修正算法，地形、地貌对风能密度的影响修正。引入地形加速因子和粗糙度长度参数，综合考虑起伏度、坡向及大气稳定度，对原始风速进行空间降尺度校正，可有效降低复杂地形下风资源评估偏差。(2) 基于时序大数据的风资源精准预测模型构建。融合多源观测与数值模拟数据建立长时序数据库，采用 LSTM、Transformer 及图神经网络等方法实现多测塔空间关联与时序预测，形成“数据同化-特征提取-时空预测-误差订正”全链条技术体系。(3) 低风速资源开发潜力分级评价体系搭建。从资源条件、技术可行性和经济可行性三维度构建指标体系，利用层次分析与模糊综合评价将开发潜力划分为优先开发区、适宜开发区、一般开发区和限制开发区四个等级，为项目选址排

序提供决策依据。

2 新能源风电低风速资源开发关键技术

2.1 低风速专用风电机组优化设计技术

(1) 大直径长叶片气动优化技术, 提升低风速风能捕获能力。针对低风速区风能密度低的特点, 采用增大叶轮直径提升扫风面积的技术路线, 单位千瓦扫风面积提升至 $5.0\text{m}^2/\text{kW}$ 以上。通过优化翼型设计、采用碳纤维轻量化材料及弯扭耦合结构, 显著提高叶片气动效率, 配合流动控制装置延缓气流分离, 有效提升低风速段风能捕获能力。(2) 低风速高效发电机适配技术, 降低启动风速、提升发电转化率。采用永磁直驱或半直驱同步发电机结构配合全功率变流器, 通过降低额定转速、优化电磁设计以减小切入转矩, 将机组切入风速降至 $2.5 \sim 3.0\text{m/s}$ 。高速永磁发电机与中速齿轮箱组合方案兼顾效率与可靠性, 发电机效率可达 97% 以上^[3]。(3) 轻量化塔筒与高塔筒技术, 适配低空风切变、捕捉高层优质风能。针对低风速区风切变显著的特点, 将轮毂高度提升至 $120 \sim 160\text{m}$ 以捕获高层优质风能。采用全钢柔性塔筒或混凝土-钢混合塔筒结构, 配合阻尼减振装置抑制涡激振动, 兼顾高塔筒安全性与经济性。

2.2 低风速风电场布局与微观选址技术

(1) 低风速风电场宏观选址原则, 结合资源分布、负荷区位、电网条件。优先选择年均风速 $\geq 4.5\text{m/s}$ 、有效风时数高的区域, 同时考量邻近负荷中心以降低送出成本, 系统评估电网消纳能力和接入条件, 综合用地性质、生态红线及交通运输条件形成候选场址方案。(2) 微观点位优化布置, 规避尾流效应、降低场内能量损耗。采用尾流模型进行机组排布优化, 通过加大机组间距至 $5 \sim 8$ 倍叶轮直径并优化行间偏移角度, 使全场尾流损失控制在 $5\% \sim 8\%$ 以内; 结合 CFD 仿真对复杂地形点位精确校核, 提升微观选址科学性。(3) 分散式低风速风电场布局优化方案与适配场景。针对中东部土地资源紧张的特点, 采用“自发自用、余电上网”的分散式开发模式, 以单机或少量机组就近接入配电网, 结合工业园区、城镇周边及农业设施等场景, 充分利用零散地块, 降低集中开发对大片土地的依赖。

2.3 低风速风电运行控制优化技术

(1) 自适应风速追踪控制策略, 适配低风速波动工况。采用基于实时风速测量的增益调度控制方法, 结合卡尔曼滤波或神经网络估算有效风速, 依据风速变化在线调整控制参数, 使机组在频繁波动工况下维持最佳叶尖速比, 提高动态跟踪精度。(2) 变桨距、变速

恒频精准控制技术, 提升低风速发电稳定性。低风速段采用变速控制使风轮转速跟随风速变化, 维持在最优功率系数附近; 风速接近额定值时切换至变桨控制限制功率输出, 借助先进控制算法确保转速与功率调节精准稳定^[4]。(3) 智能启停控制技术, 减少低风速弱风时段机组能耗。综合风速时序趋势与历史统计特征智能决策机组启停状态, 采用低功耗待机模式替代持续空转, 配置辅助启动装置缩短启动时间, 实现年均自耗电占比降至 1% 以下。

2.4 低风速风电并网适配技术

(1) 低风速风电出力波动特性对电网的影响分析。低风速风电出力分钟级最大变幅可达装机容量的 $20\% \sim 30\%$, 易引发电网频率偏差和电压闪变; 风速随机性强导致日前功率预测误差达 $15\% \sim 25\%$, 给电网调度造成压力, 低电压穿越能力亦面临更高要求。(2) 储能协同并网调控技术, 平抑出力波动、提升电能质量。采用电化学储能与风电场联合配置, 利用储能快速充放电特性平抑出力波动, 通过一阶低通滤波或模型预测控制算法实时分配储能功率, 有效降低并网点功率变化率, 同时利用储能无功调节功能改善电压质量^[5]。(3) 低风速风电消纳优化与电网友好型运行技术。基于超短期风速预测与日前电价预测制定最优发电计划, 通过参与绿电交易等市场化手段拓展消纳空间; 配置虚拟惯量响应与下垂控制功能, 使风电场具备主动支撑电网频率和电压的能力, 实现电网友好型运行。

3 新能源风电低风速资源开发工程应用与发展展望

3.1 典型低风速风电场工程案例

(1) 中东部平原低风速风电场项目概况与技术方案。以河南东部某平原低风速风电场为例, 装机容量 100MW , 安装 40 台单机容量 2.5MW 风电机组, 轮毂高度 140m , 叶轮直径 140m , 设计年均风速 5.2m/s 。采用全钢柔性高塔筒技术配合永磁直驱发电机, 微观选址采用 CFD 仿真优化排布, 机组间距 6 倍叶轮直径, 全场铺设测风雷达开展后评估验证。(2) 项目关键技术应用效果与发电效益数据分析。高塔筒技术使 140m 高度风速较 100m 提升约 8% , 年等效满发小时数达 2150h , 较常规方案提升约 12% ; 尾流损失控制在 6.5% 以内, 综合厂用电率约 1.8% , 年发电量约 2.15 亿 kWh , 项目资本金内部收益率约 9.5% 。(3) 工程应用中的技术问题与解决方案总结。针对高塔筒涡激振动问题, 采用主动阻尼控制策略, 结合调谐质量阻尼器有效抑制塔筒一阶摆动, 振动幅值降低 40% ; 针对低风速段频繁启停机导致的齿轮箱磨损, 优化智能

启停策略并加强在线油液监测,有效延长大部件维护周期。

3.2 低风速风电开发经济性与环保性分析

(1) 低风速风电项目投资、运维成本核算。当前低风速风电项目单位千瓦投资约为 6500~7500 元/kW,其中风机设备占比约 50%、塔筒基础约 20%、道路集电线路约 15%、升压站及接入约 10%、其他费用约 5%。年运维成本约 80~120 元/kW,主要包括日常检修、备品备件及大部件维护支出。(2) 发电收益、节能效益与投资回报周期分析。按等效满发小时数 2000~2300h、上网电价 0.35~0.40 元/kWh 测算,年发电收入约 700~920 万元/万 kW,项目投资回收期约 7.5~9.0 年,全生命周期(20 年)平准化度电成本约 0.32~0.38 元/kWh,已初步具备平价上网竞争力。(3) 低碳环保效益与生态适配性评价。单个 10 万 kW 低风速风电场年发电量约 2.1 亿 kWh,可替代标煤约 6.5 万吨/年,减排 CO₂ 约 17 万吨/年。通过优化施工便道与吊装平台选址,避让林地与耕地,同步推进植被恢复与水土保持,可实现风电开发与生态保护的协调发展。

3.3 当前低风速风电开发存在的技术与产业问题

(1) 核心设备国产化适配精度不足、专用机型迭代缓慢。国内低风速专用机型研发起步较晚,叶片气动设计、轻量化材料及大功率变流器等核心部件在低风速工况下的适配精度与国外先进水平存在差距,专用机型迭代周期长达 3~5 年,难以快速响应资源条件变化需求。(2) 精细化运维技术缺失、机组长期运行效率衰减明显。低风速机组频繁运行于额定功率以下,变桨系统和齿轮箱磨损加剧,基于大数据的状态监测和故障预警系统应用不充分,机组运行 3~5 年后发电效率衰减可达 3%~5%。(3) 产业标准、配套政策体系不完善。低风速资源评估、高塔筒设计、分散式风电并网等环节缺乏统一技术标准,用地审批、电网接入等配套政策协调难度大,绿电交易和碳交易市场机制有待健全。

3.4 低风速风电开发技术发展趋势与展望

(1) 智能化、数字化技术融合,智慧低风速风电场建设趋势。物联网、人工智能与数字孪生技术将深度融合风电全生命周期管理,通过机组状态感知、功率精准预测、自优化控制与远程智能运维,实现低风速风电场“少人值守、智慧运营”。(2) 机组轻量化、高效化、低成本化技术迭代方向。大兆瓦级低风速机型(5~7MW)将加快应用,碳纤维拉挤板、分段叶片及桁架式塔筒助力轻量化降本,超导发电机、中速永磁等高效传动技术有望推动转换效率再提升 3%~5%。(3) 风光储协同开发、分布式低风速风电规模化发展前景。低风速资源分布与中东部负荷中心高度重合,依托存量火电调节能力和储能配套,“风光储”多能互补一体化开发模式将加速落地,“千乡万村驭风行动”政策的推进也将有力推动分散式低风速风电规模化发展。

结束语

综上,低风速风电技术的迭代升级,有效盘活了我国中东部及南方零散风能资源,兼顾能源保供、低碳减排与生态适配多重价值,已具备平价上网开发条件。当前行业仍存在设备适配不足、运维精细化欠缺、标准体系不完善等问题。未来依托数字智能、机组轻量化革新与风光储协同模式,持续提升资源利用率与项目收益,推动低风速风电成为新能源高质量发展的重要支撑。

参考文献

- [1] 夏婷,张木梓,陈杨,等.全球低风速风电发展现状与展望[J].水力发电,2022,48(06):105-108.
- [2] 娄利岗,任韶华,王桢.半直驱中速永磁风力发电机设计与特性研究[J].微电机,2023,56(07):51-54+58.
- [3] 陈海峰,刘杰,周健.分段翼型设计在 78m 低风速风电叶片中的应用[J].风能,2024,9(05):62-67.
- [4] 王子顺.低风速半直驱风电机组运行匹配优化技术研究[J].太阳能,2024,15(05):101-104.
- [5] 耿明丰.风电机组全风速段多目标发电优化控制研究[J].电气技术与经济,2024,17(09):68-74.