

# 低风速区域风力发电效率提升技术研究

徐文强

大唐山东发电有限公司新能源分公司 山东 济南 250014

**【摘要】**：全球能源清洁低碳转型持续推进，低风速区域风能开发成为风电产业拓展的重要方向，低风速风况与机组适配性不足制约发电效率提升，本文围绕风能捕获、机组控制、能量转化传输展开技术优化，改良叶片气动设计与风轮参数，健全变桨距及启动控制，升级功率调节与输电系统，各类技术相互配合能够提升风能利用率与运行稳定性，提升发电收益，为低风速风电高效开发筑牢技术支撑，助力可再生能源实现规模化利用。

**【关键词】**：低风速；风力发电；效率提升；风能捕获；机组控制

DOI:10.12417/2811-0536.26.07.004

## 引言

能源结构转型与双碳发展理念深入落地，风能作为可再生能源核心构成，开发重心逐步向资源广袤的低风速区域延伸，高速区域开发趋于饱和，低风速风电具备广阔应用前景，受风况特性、设备适配性、系统损耗等多重因素影响，整体发电效能难以达到理想水平，聚焦低风速风力发电效率提升关键技术，从资源捕获、机组控制、能量传输全链条开展优化研究，可为低风速风电场高效运行提供可行路径，助力风电产业高质量发展。

## 1 低风速区域风力发电发展现状与研究价值

全球能源结构向清洁低碳转型过程中，风能开发重心逐步向资源分布更广的低风速区域延伸，年均风速低于6.5米每秒的低风速区域占据全球陆地大面积范围，成为风电产业拓展的核心方向，高速区域风电开发已趋于饱和，低风速风电依托丰厚的资源储备，成为弥补能源供给缺口的重要支撑<sup>[1]</sup>。风速偏低、波动频繁、地形条件复杂等多重因素，使得低风速风电场普遍存在发电效率偏低、设备运行稳定性不足、经济性不佳等状况，规模化开发进程因此受到限制，对低风速风力发电效率提升技术展开深度探究，可健全适配低风况的风电技术体系，带动风电开发向更广区域铺开，助力可再生能源高效利用与能源转型目标的达成。

## 2 低风速区域风力发电效率制约因素

### 2.1 风能捕获效率受低风况条件限制

低风速区域常年风速偏低且气流稳定性差，风能密度整体处于较低水平，风机难以持续维持高效捕获状态，风速季节性与短时波动特征显著，复杂地形下湍流效应更为突出，直接削弱叶片对风能的吸收效果，自然风场风向变化无规律，风轮无法始终保持正对来流的最佳姿态，风能利用系数持续偏低，低风速区间

多接近风机启动临界值，有效发电时长被压缩，风能资源向机械功率转化的比例大幅降低，尾流干扰还会进一步降低后排机组入流风速，形成区域性风能捕获短板，整体风场发电能力难以充分释放。

### 2.2 风电机组运行控制与低风速适配不足

现有风电机组控制逻辑多以高速工况为设计基准，低风速区间响应速度与调节精度明显不足，变桨系统与转速调节机制难以匹配波动气流，无法稳定追踪最优运行点进而造成风能流失，低风速下机组频繁启停切换，控制程序响应滞后，发电连续性降低，机组机械载荷与磨损程度同步增加<sup>[2]</sup>。传统最大功率点跟踪策略在低风速、强扰动环境下跟踪慢、稳态误差大，难以实现风能高效捕获，机组协同控制缺失，单台优化无法提升风场整体效能，控制体系与低风场特性不匹配问题尤为突出。

### 2.3 能量转化与传输环节存在效能损耗

低风速工况下发电机输出功率偏小、运行负荷偏低，机电能量转换效率偏离最优区间，损耗占比随之上升，机组内部传动链在低转速低载荷下摩擦损耗有所增大，机械功率向电能转化过程伴随额外损耗，场内输电线路在低功率长距离传输时，线损占比随输出功率下降逐步提高，电能传输稳定性与利用效率随之降低，低风速发电间歇性特征突出，电能波动幅度较大，并网与变换环节需消耗更多调节能量，整体传输效率被进一步压低，机械捕获至电网并入的全流程损耗相互叠加，低风速风电最终可用电能明显缩减。如图1。



图1 低风速风电能量转化与传输全流程损耗示意图

### 3 低风速区域风力发电效率提升技术路径

#### 3.1 优化风能捕获装置提升风能利用率

(1) 改进叶片气动结构设计: 叶片气动结构直接决定低风速环境下的风能捕获能力, 优化气动外形可提升低风速段风能利用系数, 调整叶片翼型厚度分布与弯度参数, 增强低来流风速下的升阻特性, 使风轮在低速气流中产生稳定转矩, 降低启动阻力, 延长叶片前缘半径并优化表面粗糙度处理, 减少低风速下气流分离现象, 维持叶片表面稳定层流状态, 避免气流紊乱造成能量损失, 针对低风速风场湍流强度偏高的特点, 适当增加叶片柔性 with 扭转角度, 自适应匹配瞬时风速变化, 降低湍流冲击带来的功率波动, 合理设置叶片叶尖构型, 抑制叶尖涡流形成, 减少气动噪声与能量耗散, 使低风速风能更高效转化为风轮机械能, 多维度气动结构改良可拓宽风机高效运行区间, 让机组在低于常规启动风速条件下稳定捕获风能, 提升全时段发电能力。

(2) 优化风轮直径与转速匹配: 风轮直径与运行转速的科学匹配, 是提升低风速风能利用率的关键环节, 扩大风轮直径可增加风能扫掠面积, 在同等低风速条件下捕捉更多气流能量, 弥补低风密度造成的捕获短板, 直径增大后需同步适配最优运行转速, 防止转速偏高或偏低引发风能损耗, 转速设置过高会加重气流冲击致使叶片失速, 转速过低则难以充分汲取风能造成能量转化效率下滑, 结合低风速场实际特征, 运用大直径风轮配合低额定转速的组合形式, 可增强风轮对低速气流的适配能力, 保持稳定的叶尖速比, 借助动态调节模式让风轮转速随实时风速灵活变动, 持续处于最佳捕获范围以降低功率损耗, 经优化的直径与转速匹配策略, 可放宽机组最低工作风速限制, 延长有效发电时长, 同时减轻传动系统负荷, 提升低风速工况下的运行稳定性与综合发电效率。

#### 3.2 改进机组运行控制增强低风适应性

(1) 优化变桨距控制策略: 变桨距控制策略直接决定风机在低风速区间的功率输出稳定性, 适配低风况的控制逻辑可提升风能转化效率, 针对低风速波动频繁、气流扰动较强的特点, 调整桨距角调节速率与响应阈值, 缩短控制系统对风速变化的反应时间, 确保叶片始终处于最佳攻角状态, 摒弃传统高风速工况下的控制参数, 建立以低风速段为核心的调节模型, 在风速接近风机临界工作区间时小幅微调桨距角, 维持风轮转矩平稳, 避免角度突变造成风能流失<sup>[3]</sup>。结合实时转速与功率反馈信号形成闭环调节机制, 弱化

湍流带来的干扰, 提升机组在弱风环境下的运行平顺性, 通过精细化控制参数匹配, 减少无效调节动作, 降低变桨机构动作频次, 既提升低风速功率捕获能力, 又减轻机械部件损耗, 延长机组稳定运行周期, 让风机在持续低风速条件下保持高效发电状态。

(2) 完善低风速启动控制逻辑: 低风速启动控制逻辑是风机进入高效发电状态的关键, 优化启动流程可拓宽有效工作风速下限, 提升弱风环境下的机组利用率, 重构启动判断机制, 降低风速触发阈值, 结合风轮转速、转矩等多维度信号综合判断启动条件, 避免单一风速指标造成的误判或迟滞, 启动过程中采用平滑加速模式, 逐步提升风轮转速, 减少传动系统冲击, 防止低风速下启动失败或频繁启停, 优化启动阶段功率跟踪逻辑, 提前介入最优转速追踪流程, 使机组从静止到并网过渡更顺畅, 缩短低风速下启动响应时间, 针对复杂地形风速不均问题, 加入自适应启动修正环节, 根据现场风况动态调整启动参数, 确保多变低风条件下可靠启动, 完善后的控制逻辑能够提升机组在低风速区间的待机与启动效率, 增加有效发电时长, 为整体发电效率提升提供基础保障。

#### 3.3 提升能量转化与传输系统运行效能

(1) 优化发电机功率调节机制: 发电机功率调节机制直接影响低风速工况下的能量转换效率, 适配低负荷特性的调节方式可提升机电转换效能, 低风速环境下发电机输出功率偏小, 传统恒定参数调节易使运行点偏离高效区间, 导致励磁损耗与铜损攀升, 构建宽范围高效运行曲线, 将调节重心向低功率区间偏移, 实时匹配输入转矩与输出电磁转矩, 维持稳定功率输出状态<sup>[4]</sup>。采用自适应励磁控制方式, 根据实时转速与负载水平动态调整励磁电流, 降低轻载下的无功损耗, 提升功率因数, 结合最大功率点跟踪结果, 同步协调发电机输出, 实现机械功率与电功率快速精准对接, 减少转换过程中的能量耗散, 优化后的调节机制可拓宽高效运行范围, 在低风速持续波动条件下保持稳定转换效率, 同时降低机组发热与振动, 提升长期运行可靠性, 为低风速风电稳定输出提供支撑。

(2) 减少输电线路能量损耗: 输电线路能量损耗是拉低低风速风电整体效益的重要因素, 低功率输出时段线路损耗占比更高, 需通过系统性优化实现降损增效, 低风速风电场分布范围广, 机组分散布置会拉长输电距离, 线路电阻与阻抗引发的损耗也随之加大, 选用截面匹配的导电线材, 降低单位长度电阻值, 从硬件层面减少基础损耗, 优化场内电网拓扑结构, 缩短机组到汇集站的传输路径, 采用多点就近汇集方式,

避免长距离低压输送,合理提升线路运行电压等级,减小传输电流幅值,降低电流热效应带来的能量损失,加装动态无功补偿装置,平抑低风速发电带来的电压波动,改善电能质量,减少因波形畸变产生的附加损耗,通过线路配置、拓扑结构与补偿装置的协同优化,可显著降低低功率传输阶段的综合损耗,提升机组输出至电网接入的整体能效,保障低风速风电发电量得到高效利用。

#### 4 低风速发电增效技术应用效果与实践价值

##### 4.1 风能捕获优化后的实际利用效果

风能捕获装置经过系统性优化后,低风速区域风机对弱风气流的捕捉与转化能力得到明显提升,有效拓宽机组可利用风速区间,使接近临界启动风速的气流资源得以充分利用,叶片气动结构改良后,低风速下的升阻特性更稳定,气流分离现象得到抑制,风轮转矩输出更加平顺,风能利用系数保持在较高水平,扩大风轮直径并匹配最优转速后,风机扫掠面积增大,单位时间内可捕捉的气流动能显著增加,弥补低风速区域风能密度不足的缺陷<sup>[1]</sup>。风轮与风速的动态适配能力增强,能够持续追踪最佳叶尖速比,减少因气流波动造成的能量流失,优化后的风能捕获系统可在复杂地形与多变风况下稳定工作,降低湍流与尾流带来的捕获损失,延长单日有效发电时长,让低风速风能资源从难以利用转变为稳定可采集的能源,为风电场整体效率提升奠定坚实基础。

##### 4.2 机组控制改进带来的运行稳定效益

机组运行控制策略优化后,低风速风电场的运行稳定性与连续作业能力显著增强,有效解决弱风环境下控制响应滞后、运行状态波动等问题,变桨距控制与启动逻辑完善后,机组对风速变化的感知与调节速度进一步加快,桨距角调整更为精准柔和,避免频繁动作引发的机械冲击与功率震荡,低风速启动条件优化后,机组启停更为平稳,误动作与重复启动次数大幅减少,传动系统、变桨机构等关键部件的载荷与磨

损程度明显降低,设备故障率也同步下降,最大功率点跟踪控制融入全程运行逻辑,使风机在低风速波动中始终保持高效运行点,输出功率曲线更为平滑且无大幅跳变现象,机组协同运行能力得到提升,单台设备的稳定状态可带动全场运行节奏趋于一致,减少局部扰动对整体风场的影响,长期稳定运行可降低运维频次与检修成本,延长设备服役周期,为低风速风电场安全高效、持续可靠运行提供可靠保障。

##### 4.3 能量系统优化实现的整体发电增益

能量转化与传输系统的优化,有效打通从风能捕获、机械能转化到电网输送的全流程效率瓶颈,大幅提升低风速风电最终可用发电量,发电机功率调节机制向低功率区间倾斜,让轻载运行更贴近高效工作区间,励磁损耗与铜损得到有效控制,机械功率向电能的转化过程更为充分,输电线路与场内电网结构同步改进,长距离传输与低压输送带来的线路损耗相应降低,动态补偿装置能够平抑电压波动,减少波形畸变产生的附加能量损失,风轮捕获、机组控制与能量输送形成全链条协同作用,让低风速风能实现高效转化与稳定传输,缩减中间环节的能量浪费,系统优化后,风电场等效满负荷发电时长有所增加,机组综合利用率同步提高,在同等风资源条件下可产出更多稳定电能,各项优化措施共同提升项目经济效益与并网兼容性,推动低风速风力发电从补充能源逐步转向稳定可靠的主力清洁能源。

#### 5 结语

低风速区域风电效率提升,依托风能捕获、机组控制及能量转化传输全链条技术优化,改良叶片气动结构、匹配风轮参数可增强弱风捕捉能力,优化变桨与启动逻辑可提升机组适应性,完善功率调节与降低线路损耗可减少能量流失,多项技术协同运用,可有效改善低风速风电运行状态,提高发电稳定性与综合效益,为低风速风能规模化、高效化开发利用提供坚实保障,助力清洁能源产业稳步发展。

#### 参考文献:

- [1] 杨俊元.低风速区域风电场运行效率提升的关键技术研究[J].节能,2025,44(05):25-27.
- [2] 帕尔哈提·波拉提.低风速条件下的平原风电场机组选型与布置研究[D].东北石油大学,2023.
- [3] 魏英华.低风速垂直轴发电机及磁悬浮电机优化设计[D].曲阜师范大学,2023.
- [4] 刘乐.风力发电机组的功率控制及载荷分析[D].兰州理工大学,2023.
- [5] 王富富.低风速环境下聚风发电装置的结构设计与气动特性分析[D].中北大学,2023.