

# 风电机组低风速启动性能提升的关键技术分析

李孟佳

天津国投新能源有限公司 天津 301509

**【摘要】**：低风速启动性能提升关乎风电机组在低风资源区域的实际应用，针对机组启动阶段气动与结构层面的现存问题，依托变桨角调节、叶片气动优化、传动系统改造构建技术方案，改善启动力矩偏小、运行阻力偏高、扭矩与转速匹配失衡等状况，实现启动风速降低与整机启动性能优化。技术方案结合现场工况完成适配与参数调试，保障技术应用与机组实际运行状态相契合，配套的效能验证方式可为技术落地效果提供客观评判依据。该技术路线可为小型变桨风电机组控制系统设计与结构改进提供技术参考，支撑低风速专用风电机组的研制与推广，助力风电机组在用户侧实现更大范围的应用。

**【关键词】**：风电机组；低风速启动；变桨角调控；气动性能；传动系统

DOI:10.12417/2811-0536.26.07.087

## 1 风电机组低风速启动的性能瓶颈

风电机组低风速启动的性能瓶颈主要源于气动设计与结构适配的技术短板，低风速环境下风轮难以产生充足启动力矩，定桨距叶片的扭角参数无法同时满足启动与发电工况需求，大扭角虽能增强启动扭矩，却会显著削弱高风速段的风能捕获效率。风轮静止状态下叶根部位易出现明显流动分离，分离区域前移且伴随剧烈涡旋，气动性能持续衰减，难以为启动过程提供稳定动力支撑<sup>[1]</sup>。传动系统静态阻力矩偏高，齿槽转矩、轴承摩擦损耗与轴系装配偏差等因素叠加影响，导致风轮无法脱离静止状态实现自主启动。桨距角调节方案与低风速工况的匹配度不足，小角度调节下静态扭矩数值偏低，大角度调节虽可提升扭矩，却会大幅降低风轮稳定运转转速，现有调节手段无法兼顾启动扭矩与转速控制，机组在3~6m/s风速范围内的启动成功率始终处于较低水平。

## 2 风电机组低风速启动性能的提升技术

### 2.1 变桨角自适应调控技术研发

变桨角自适应调控技术研发围绕桨距角与低风速启动特性的耦合关系展开，依托风洞试验获取3~6m/s风速区间内，桨距角对静态扭矩与转速的影响特征，构建桨距角实时调控算法模型，匹配不同低风速区间对应的最优桨距角参数。在轮毂内部装配齿条齿轮传动结构，实现叶片桨距角的精准轴向调节，结合数值模拟所得的叶根气动性能数据，将40°设定为启动桨距角核心阈值，建立桨距角随风速、风轮转速同步变化的控制逻辑，破解固定桨距角模式下扭矩与转速难以兼顾的技术难题。该技术可实现低风速环境下启动力矩与旋转速度的协同优化，为变桨控制系统设计提供精准的技术参数支撑，其控制逻辑可为各类小

型变桨风力机的低风速启动控制提供工程参考，也为大机型变桨技术适配低风速工况提供试验层面的技术依据。

### 2.2 叶片气动结构优化设计技术

叶片气动结构优化设计技术围绕低风速环境中叶根气动性能提升与流动分离控制展开，依托NACA 4412翼型实测数据，对叶片各截面弦长与扭角分布开展定向优化，侧重改进叶根部位气动构型，通过修正叶根截面扭角与弦长参数，改变气流在叶根表面的附着特性，推动流动分离点向后缘迁移，降低前缘涡旋的产生概率。依据静止工况下叶片压力云图呈现的压差特征，优化叶片压力面与吸力面的曲面弧度，提升叶根区域压差水平，增强低风速条件下的静态启动力矩<sup>[2]</sup>。同步保障叶片叶尖区域的气动适配效果，避免优化措施对高风速风能利用效率产生负面影响，该项设计技术完善了小型风力机叶片气动结构与低风速启动条件的匹配体系，依托气动性能试验形成的优化路径，可为低风速专用风力机叶片的研发提供规范化的设计参考。

### 2.3 低阻传动系统适配改造技术

低阻传动系统适配改造技术围绕风力机启动阶段静态阻力矩问题展开，经测试梳理出发电机齿槽转矩、轴承摩擦转矩、轴系安装偏差形成的附加阻力矩等主要阻力源，对传动系统核心构件实施结构优化与精度升级。选用加工精度更高的变桨轴承与主轴轴承，降低轴承运转摩擦系数，优化主轴与联轴器的同轴度设计，消减轴系安装偏差引发的额外阻力，对发电机内部结构做针对性调整，弱化齿槽转矩对启动过程的干扰。依据扭矩测试所得的阻力矩数据，完成传动系统整体阻力匹配调试，使系统静态阻力矩与低风速环境

下的启动力矩精准契合，该技术从阻力源头改善风轮难以脱离静止状态的技术问题，其阻力分析与改造思路为风力机传动系统的低风速适配设计提供量化参考，也为提升各类旋转机械低载荷启动性能提供可复用的技术路径。见图1。

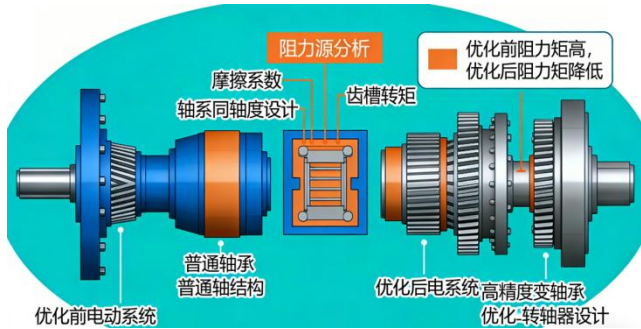


图1 风电机组传动系统阻力源分析及低阻改造前后对比示意图

### 3 风电机组低风速启动技术的落地应用

#### 3.1 机组启动系统的技术适配应用

机组启动系统的技术适配应用依托风洞试验获取的启动性能参数，将变桨角自适应调节、叶片气动优化、低阻传动改进等关键技术，与机组原有启动系统完成软硬件层面的有效融合<sup>[3]</sup>。硬件环节实现轮毂齿条齿轮变桨结构与机组驱动部件的顺畅对接，更换传动系统内阻较高的轴承及装配精度不足的构件，满足低阻传动改造的各项技术指标；软件环节引入桨距角实时调节算法，将40°最优启动桨距角临界值、各风速区间扭矩与转速匹配数据嵌入机组控制程序，达成启动系统与各类改进技术的参数协同，使系统硬件布局与控制逻辑全面适配低风速启动工况，该适配模式可为同类型机组启动系统的技术更新提供规范化的实施流程与硬件配置依据。

#### 3.2 现场工况的技术参数调试应用

现场工况技术参数调试应用以3~6m/s低风速区间为核心范围，参照风洞试验中静态扭矩与转速的变化特征，在实际工况下对机组启动系统完成参数标定与动态调试。调整变桨机构齿条的轴向移动行程，精

准控制叶片桨距角的调节精度，校准40°启动桨距角的实际输出数值；结合现场风速的实时波动情况，优化桨距角与风速、转速的联动调控参数，缩小风洞试验数据与现场实际工况间的偏差。开展低阻传动系统的现场阻力矩检测，微调轴承配合间隙与轴系同轴度，使传动系统阻力矩与现场低风速启动力矩精准适配，相关调试参数与操作方法为低风速区域机组的现场参数校准提供量化技术支撑。

#### 3.3 技术落地后的运行效能验证

技术落地后的运行效能验证依据GB/T 19068.3-2019风洞试验规范，搭建现场整机启动性能测试平台，完成多工况下启动效能的量化验证。现场测定各风速区间机组的静态扭矩、启动风速及稳定转速数值，对比技术应用前后的性能指标，验证变桨角调节与叶片气动优化对启动力矩的改善效果。长期追踪传动系统的运行阻力变化，验证低阻改造方案在实际工况中的运行稳定性。采集机组在3.7m/s最低启动风速下的连续启动数据，验证多项技术协同应用的实际启动成功率。该验证流程与测试指标为风力机低风速启动技术的落地效果检验提供统一的测试规范与数据评估框架，也为技术的后续迭代升级提供可靠的现场实测数据依据。

### 4 结语

低风速启动性能提升关乎风电机组在低风资源区域的实际应用，针对机组启动阶段气动与结构层面的现存问题，依托变桨角调节、叶片气动优化、传动系统改造构建技术方案，改善启动力矩偏小、运行阻力偏高、扭矩与转速匹配失衡等状况，实现启动风速降低与整机启动性能优化。技术方案结合现场工况完成适配与参数调试，保障技术应用与机组实际运行状态相契合，配套的效能验证方法可为技术落地效果提供客观评判依据。该技术路线可为小型变桨风电机组控制系统设计与结构改进提供技术参考，支撑低风速专用风电机组的研制与推广，助力风电机组在用户侧实现更大范围的应用。

#### 参考文献：

[1] 吴胜胜,包道日娜,王天博,等.小型变桨风力机启动性能研究[J].动力工程学报,2022,42(10):944-950.  
 [2] 戴俊杰,黄惠兰,李刚,等.升降复合型垂直轴风力机的自启动性能和稳态性能的数值分析[J].制造业自动化,2025,47(04):175-182.  
 [3] 杜深慧,谢奇龙,赵龙,等.螺旋扭曲升降复合型垂直轴风力机气动性能分析[J].电力科学与工程,2024,40(07):70-78.