

# 风力发电系统中海上风机性能评估与运行优化研究

李明<sup>1</sup>, 王慧超<sup>2\*</sup>

(1. 浙江浙能嘉兴海上风力发电有限公司, 浙江 嘉兴 314050;  
2. 桐乡市电力工程有限责任公司, 浙江 嘉兴 314050)

**摘要** 海上风机长期运行于高湿、高盐及风况剧烈波动的环境之中, 性能衰减与运行失稳问题呈现出隐蔽化与累积化特征, 对风力发电系统的安全性与发电效率形成持续约束。本文立足于海上风机结构构成与运行特性, 依托多源运行数据与状态参数, 构建覆盖功率输出、运行稳定、设备健康与风险预警的性能评估体系, 并在评估结果反馈基础上结合变桨控制、偏航响应、结构振动调控与智能闭环管理等技术路径展开运行优化分析, 以期为海上风机性能管控与运维决策提供技术参考。

**关键词** 海上风机; 性能评估体系; 运行优化技术; 状态监测; 智能控制

中图分类号: TM61

文献标志码: A

DOI:10.3969/j.issn.2097-3365.2026.08.024

## 0 引言

在新能源装机规模持续扩展的背景下, 海上风电逐步向大容量、远海化方向发展, 风机运行工况随之呈现出更强的不确定性与复杂性。海上环境中的湍流扰动、盐雾腐蚀与载荷叠加效应, 往往诱发功率波动、结构疲劳与控制响应失衡等问题, 使传统以经验参数为主的运行管理方式难以维持稳定效率。围绕风机实际运行状态构建可量化的性能认知, 并将评估结果嵌入运行调控过程, 逐渐成为提高海上风电系统可靠性与经济性的关键技术方向。

## 1 风力发电系统中海上风机的核心组成及运行特性分析

### 1.1 海上风机核心结构组成

海上风机结构配置需兼顾承载稳定性、环境适应性与远程运维条件, 整体由基础结构、塔筒、机舱系统及控制监测单元构成, 基础形式依托海底地质条件选用单桩、导管架或吸力筒结构, 其中单桩直径多处于 5~8 m 区间, 入土深度通常控制在 20~35 m 范围内, 用于分散轴向载荷与倾覆力矩。塔筒采用分段式锥形钢结构, 与机舱形成刚性连接, 承担风轮重力与振动传递任务, 机舱内部集成主轴、齿轮箱、发电机、偏航与变桨系统, 齿轮箱多为三级斜齿结构, 传动比

常见于 1:80~1:100 区间, 兼顾升速效率与可靠性, 控制监测系统依托 SCADA 与 CMS 模块完成运行数据采集与状态反馈, 为性能评估提供基础数据支撑。

### 1.2 海上风机运行特性及影响因素

海上风机运行呈现明显的非线性与时变特征, 功率输出在额定风速附近易受风切变与湍流扰动影响而产生波动, 对控制系统响应精度提出更高要求。运行性能受风资源波动、设备服役状态、海洋环境干扰及控制延迟等因素共同制约, 其中齿轮磨损、轴承间隙变化与叶片疲劳裂纹往往引发输出不稳定<sup>[1]</sup>。为缓冲工况突变带来的冲击, 工程实践中倾向于在转速、桨距与功率限值设置动态冗余区间, 并结合风场尺度下的尾流效应进行协同调控, 以维持机组长期运行的稳定边界。

## 2 风力发电系统中海上风机性能评估体系构建

### 2.1 评估指标体系的维度划分与参数设定

海洋风电机组运行情况复杂多样, 单一性能参数无法描述机组整个运行过程中的状态变化与衰退演变过程, 适合建立包含功率性能、运行可靠性、机组健康水平与故障预判能力在内的四元性能评价指标体系, 代表性指标有风速-功率偏差度、主轴承转速波动幅度、齿轮箱振动均方根(RMS)以及综合报警频次等。它们的提取依据及判断策略如表 1 所示。

作者简介: 李明(1970-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 风力发电、海上风电、海上风电运维。

\*通信作者: 王慧超(1988-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 输变电工程、新能源发输电、智能电网。E-mail: 164062289@qq.com

表 1 风力发电系统中海上风机性能评估指标示意表

评估维度	指标名称	数据来源	单位	常用设定范围	异常阈值判定依据
功率输出	风速—功率偏移率	SCADA	%	±5%	超出 ±10%
运行稳定性	主轴转速波动率	SCADA	rpm/s	≤ 0.8 rpm/s	> 1.2 rpm/s
设备健康状态	齿轮箱振动均方根值 (RMS)	CMS	mm/s	≤ 2.0 mm/s	> 3.5 mm/s
故障预警	复合报警频率	控制器日志	次 / 24 h	≤ 2 次	≥ 5 次 / 24 h, 持续两天以上

以风速—功率偏移率  $\delta P$  为例, 需将实时功率  $P_t$  与理论功率  $P_{th}$  差值归一化为:

$$\delta P = \frac{P_t - P_{th}}{P_{th}} \quad (1)$$

其波动均值与置信区间是作为状态辨识的主要依据, 各个参数须根据机种大小、运行海域以及控制方法的不同设置浮动上下阈, 并建立可调用参数词典库, 成为模型的输入结构来源<sup>[2]</sup>。

### 2.2 运行数据多源融合与异常过滤机制设计

风机评价系统的正常运转离不开多种数据协同配合, 常用的有 SCADA (风速、发电量、电流、电压等)、CMS (轴承及齿轮箱振动) 和第三方气象数据接口 (风向、湿度、气压等), 各系统采集频率并不一致, 需要通过滑窗与线性插值来同步时间轴, 建议以 10 s 或者 60 s 周期为单位形成基础数据帧架构, 数据处理流程如图 1 所示。

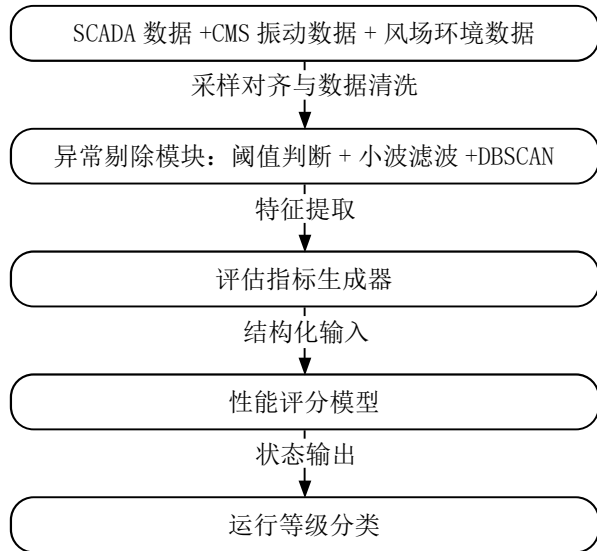


图 1 海上风机性能评估数据处理与分析流程

图 1 中的流程展示了原始数据采集、清洗到生成特征指标及评分模型的过程, 在此基础上, 为了增强数据的稳定性与可控性, 推荐使用 IEC 61400-25 协议标准, 搭建标准化接口框架, 并且构建“特征指标层—时间窗口层—模型调用层”的三级嵌套体系, 实现对高频数据模块化的抽取以及准确的模型调用。

### 2.3 综合评估模型构建与权重确定方法

完成指标体系建立、数据预处理之后, 应建立具有自学习、可解释性能评价模型。常用的策略是先利用熵值法赋予初步权重、之后结合人工神经网络基于往期数据进行误差反向传递调整校正, 最后获得权重矩阵和绩效分值输出。熵值法可以利用指标变化幅度来判断它所携带的核心信息含量大小以此制约权重偏离的合理性。人工神经网络也可灵活捕捉各项指标间随不同运营状态下的复杂非线性映射规律, 令模型拥有对各类工况场景的迁移学习能力。

为避免因某一指标值异常使得整体评分失衡, 可采用归一化加权评分机制, 并将模型输出设置为连续型评分区间 (0 ~ 100 分), 再结合运行等级划分标准设定五类健康状态等级 (优、良、中、临界、异常), 建模阶段建议引入时间滑窗机制, 使模型在处理动态序列时保留短期趋势信息, 同时可在异常事件反演分析中作为因果链条重建的辅助<sup>[3]</sup>。模型训练完成后, 应定期进行再评估, 验证其在不同风场与不同运行季节中的泛化适应性, 并对误判率较高指标重新调整阈值或分组逻辑。

### 2.4 性能退化趋势预测与预警触发机制

为增强评估系统的前瞻性, 需在静态评分基础上引入时间序列预测模块, 构建性能衰退趋势曲线并联动早期预警机制。该模块通常采用 ARIMA 模型捕捉线性演化趋势, 再叠加 LSTM 结构识别非线性演化段落, 使得评估分值既能反映目前状态, 又能提前预测未来数天或数周的风险节点<sup>[4]</sup>。为增强短时预测精度, 应重点训练模型识别“评分连续小幅下滑 + 关键指标间歇偏离”的复合征兆, 以区分随机波动与实质退化。

预警触发机制设计时不宜采用单一阈值设定模式, 而应根据机组运行年限、风场风况稳定性与历史故障频度进行差异化配置, 建议设定多级预警等级 (轻度预警、中度干预、严重停机建议), 每一等级对应具体操作建议, 如远程重启、人工巡检或预调度维保。另外, 预警结果需利用 SCADA 系统联动主控模块同步下发至值班终端界面, 并记录处置过程与反馈效果, 作为模型精度再训练与判别策略优化的样本输入。

### 3 风力发电系统中海上风机性能增强的运行优化技术

#### 3.1 基于风况自适应的变桨控制策略优化

海上风况频繁扰动, 风速轻微变化便可能引起功率波动与主轴扭矩失衡, 尤其在额定功率区段, 传统固定参数变桨控制难以适应风速非线性跳变, 往往在风轮转动惯量剧烈波动时出现响应延迟或控制过冲。变桨策略宜基于短周期风速预测结果构建自适应控制逻辑, 在多维传感器支持下生成实时桨距调整指令, 借助模糊控制与多段式目标函数动态组合形成控制面, 系统常以桨距—风速关系为核心变量, 构建如下目标函数:

$$J(t) = \min[\omega(t) - \omega_{ref}]^2 + \lambda \cdot [\theta(t) - \theta_{ref}]^2 \quad (2)$$

式(2)中,  $\omega(t)$  为主轴转速,  $\theta(t)$  为目前桨距角,  $\lambda$  为权重系数, 用于平衡转速偏差与桨距响应间的调节优先级, 为防止机械冲击与桨叶根部超载, 系统同步设置桨角变化速率限值  $\Delta\theta/\Delta t \leq 5^\circ/\text{s}$ , 并配置齿轮保护装置, 优化后变桨响应时间可控制在 2.1 s 以内, 功率偏差率收敛至  $\pm 3\%$ , 对阵风扰动抑制能力增强。

#### 3.2 风机偏航响应系统的响应精度与抗干扰性能增强

风向偏移未能及时跟踪, 是引发风机功率损失与叶轮受力不均的核心诱因之一。常规偏航系统以固定时间步长执行调整, 未能识别短周期风向抖动与主导风向迁移趋势, 易致使风轮夹角持续偏离最优点位。优化路径可从传感器阵列、响应逻辑与控制执行三方面着手, 构建高灵敏度—高冗余—高抗扰的偏航系统<sup>[5]</sup>。风向识别模块建议叠加三轴陀螺仪、双路风向标与叶轮输出偏移趋势指标, 借助局部数据熵变化识别风场扰动源; 控制逻辑上采用滑动窗口回归与趋势预测函数合成偏航目标角, 动态调节响应区间; 执行层面引入变频电机+高扭矩齿圈结构, 搭配扭矩一位移双闭环, 增强负载识别与方向修正能力。

#### 3.3 塔架振动与负载分布的主动调控技术

海上风机高耸结构在强风振动与塔顶荷载周期变化作用下易引发低频共振与疲劳裂纹, 尤其在变桨调节频繁、风速快速拉升时段更易出现结构应力集中, 为延缓结构退化与避免振动超限, 可引入“结构响应识别—主动阻尼干预—载荷分配调整”一体化控制系统。振动识别层借助高灵敏 MEMS 加速度计与转角速率传感器获取塔顶响应频谱, 频域滤波后提取 1~3 Hz 主模态激励信号并生成抑制指令。在塔体结构中布设可调式阻尼装置(调谐质量阻尼器 TMD), 由控制逻辑实时调节阻尼系数与位移响应参数, 使其产生反相干扰力降低共振效应, 配合叶片桨距不对称调节策略, 将塔顶横向载荷沿叶轮轴对称方向转移至非共振区段,

完成动载分流与疲劳风险错位分摊, 该方式在大型 6~8 MW 级别机组中应用时, 可使塔顶振动峰值下降约 27%, 叶根应力变化率控制在  $\pm 12\%$  以内, 结构服役周期延长约 3~4 年。

#### 3.4 运行优化系统的智能化闭环管理机制

在系统架构层面, 风机性能优化不应止步于局部算法调节, 更需构建具备自感知、自判断与自适应能力的闭环控制系统。该系统以 SCADA 与边缘计算模块为数据采集与初判通道, 中枢平台则集成状态识别模型、优化策略库与执行反馈通道, 形成“五段式”闭环流程: 状态识别—趋势预测—策略匹配—控制执行—效果回溯。状态识别层结合深度学习与多尺度滑窗算法, 融合历史功率曲线、异常振动信号与控制偏差数据输出目前工况标签<sup>[6]</sup>。策略匹配层采用规则树与强化学习协同机制, 根据当下负载状态、风况等级与目标输出匹配调节动作序列; 执行层利用同步接口将控制参数直接写入偏航与变桨模块; 反馈层实时读取策略效果与功率响应, 形成调整—验证—修正的多轮闭环。系统在运行过程中具备策略演化与规则迭代能力, 适用于复杂非平稳风场环境下的长周期稳定调控场景, 在多海域实测中展现出强适应性与算法收敛效率。

### 4 结束语

海上风电系统的运行稳定性与性能边界正被不断重构, 风机作为耦合结构、控制与环境的复合体, 其运行潜能的释放需依托状态认知能力与控制响应机制的同步增强。在多维数据感知体系与智能策略联动机制驱动下, 风机将具备动态自调节、自恢复与自决策特性, 逐步摆脱静态参数约束与被动响应逻辑。在风况复杂、工况多变的真实场域中, 唯有构建具备学习能力的运行优化闭环系统, 才能支撑未来高密度海域风电场的集约化管控与可预期运营。

#### 参考文献:

- [1] 陈杨明, 李刚, 刘博, 等. 海上风机共享锚的共享模式与适用性分析[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(24): 28-35.
- [2] 汪伟, 陈淑玲, 叶海滨, 等. 海上风机叶片仿生结构设计及气动力性能研究[J]. 舰船科学技术, 2025, 47(01): 24-32.
- [3] 庄宁, 龚波, 许明宇, 等. 风雨场中海上风机气动性能数值模拟研究[J]. 水道港口, 2024, 45(05): 755-763.
- [4] 喻西崇, 刘超, 刘小燕, 等. 海上风电运维技术和运维策略特点分析[J]. 海洋工程装备与技术, 2024, 11(03): 18-21.
- [5] 王天宇, 侍红南. 海上风机整机安装现状及发展趋势[J]. 船舶标准化与质量, 2024(04): 50-56.
- [6] 李志平, 朱建国, 杨金虎, 等. 单一荷载作用下海上风机桩基承载性能研究[J]. 江西建材, 2024(05): 178-180.