

# 新能源风力发电机组运行效率提升策略研究

邢恩康

神华（故城）新能源有限责任公司 河北衡水 253800

**摘 要：**新能源风力发电机组运行效率的提升是推动可再生能源高质量发展的关键环节。随着风电技术迭代加速，机组性能优化已从单纯追求发电量转向全生命周期综合能效管理。风速预测偏差、机械损耗累积等固有难题持续制约着风能转化效率，需通过气动设计改进、智能控制算法升级等技术创新，构建覆盖设计、运行、维护的全流程能效提升体系，从而实现风电场经济效益最大化。

**关键词：**新能源风力发电机组；运行效率；提升

## 引言

复杂气候环境下风力发电机组的自适应运行能力直接影响整体发电效能，低风速区发电性能不足、湍流工况下功率波动等问题凸显出现有控制策略的局限性。研究融合流体力学优化、数字孪生仿真等前沿技术的效率提升方案，建立环境参数与运行参数的动态匹配机制，将成为突破风能利用效率瓶颈的重要技术路径，对促进风电产业提质增效具有现实意义。

### 1 新能源风力发电机组运行效率提升的重要性

#### 1.1 提升新能源消纳能力的关键环节

风力发电机组运行效率的提升直接影响新能源电力系统的消纳能力，随着风电装机容量持续增长，电网对波动性电源的接纳压力日益加大。高效率运行的风电机组能够最大化利用风能资源，提高单位装机容量的发电量输出，有效缓解弃风限电问题。通过优化控制策略和机组性能，可显著提升低风速条件下的发电效率，延长有效发电时间。同时，效率提升有助于降低度电成本，增强风电的市场竞争力，为新能源大规模并网消纳创造有利条件。在碳中和目标下，风电效率提升将成为增加清洁能源供给的重要途径。

#### 1.2 降低风电开发成本的经济需求

风电机组运行效率的提升对降低全生命周期开发成本具有显著作用，效率提升直接增加发电收益，缩短投资回收期。通过减少无效运行时间，可降低设备磨损和维护成本。优化后的机组能够适应更宽的风速范围，提高风场整体利用率。效率提升还能减少备用容量需求，优化电网配套投资。在当前风电补贴退坡的背景下，效率提升带来的经济效益更

加凸显。持续的技术创新和效率改进是风电行业实现平价上网后保持竞争力的核心要素。

#### 1.3 推动行业技术进步的重要动力

运行效率提升需求驱动着风电全产业链的技术创新，叶片气动设计优化促进新材料和新工艺发展，传动系统效率改进推动精密制造技术进步，智能控制策略创新加速数字化技术应用。效率提升研究还带动了气象预测、电网互动等相关领域发展。持续的效率改进要求倒逼企业加大研发投入，形成良性的技术创新循环。效率指标已成为衡量风电机组技术水平的关键参数，引领行业向高性能、高可靠性方向发展。通过效率提升研究，可促进我国风电产业从规模扩张向质量效益型转变。

## 2 风力发电机组运行效率影响因素分析

### 2.1 风能资源特性影响

风能资源的时空分布不均对机组运行效率构成显著制约，风电场选址阶段的资源评估不准确，导致实际风况与设计预期存在偏差。风速的间歇性和波动性造成机组频繁启停，增加机械损耗和发电损失。风向变化导致偏航系统频繁动作，产生额外的能量消耗。风切变效应使叶片承受不均匀载荷，影响气动性能。湍流强度过高加剧机组振动，降低发电稳定性。这些风资源特性问题难以通过常规手段完全规避，需要通过精细化评估和适应性设计来缓解影响。

### 2.2 机组设计与选型问题

机组设计与实际运行条件不匹配是效率损失的重要原因，叶片气动外形设计未充分考虑低风速特性，导致启动性能不佳。发电机额定功率与风场风况不匹配，造成容量浪费

或超负荷运行。塔筒高度设计未优化,未能充分利用风剪切效益。变频器容量裕度过大,增加自身损耗。控制系统参数设置保守,限制性能发挥。这些设计选型问题在项目前期难以完全预见,后期改造调整空间有限,直接影响机组全生命周期的运行效率。

### 2.3 运行控制策略缺陷

传统控制策略的局限性制约了机组性能的充分发挥,固定转速控制模式无法适应风速变化,造成气动效率损失。功率曲线跟踪算法响应滞后,错过最佳工作点。偏航控制过于频繁,增加无功损耗。保护阈值设置过于保守,限制性能边界。集群控制缺乏协调,导致尾流效应加剧。这些控制策略问题使机组无法实时保持最优运行状态,造成可避免的能量损失,需要通过智能控制算法加以改进。

### 2.4 设备维护管理不足

维护管理不善导致机组性能持续劣化,状态监测系统覆盖不全,难以及时发现性能下降。预防性维护执行不到位,小故障积累成大问题。润滑油更换不及时,增加传动损耗。叶片清洁维护缺失,表面污染影响气动性能。电气连接检查疏漏,接触电阻增大。这些维护管理问题导致机组长期偏离设计性能运行,效率损失随时间累积,需要通过完善管理体系来改善。

## 3 新能源风力发电机组运行效率提升策略

### 3.1 风电场微观选址优化技术

风电场微观选址优化是提升机组运行效率的首要环节,基于高精度风资源评估,采用计算流体力学(CFD)模拟技术,建立三维地形风场模型,准确预测各机位的风能分布特征。结合长期气象数据,分析风向玫瑰图和风速频率分布,优化机组排布方案。应用智能优化算法,平衡尾流影响与土地利用效率,确定最佳机位坐标。考虑复杂地形条件下的风加速效应,优先选择风能富集区域。建立选址后评估机制,通过实际运行数据验证选址效果。微观选址优化可显著提高风能捕获效率,为后续运行奠定良好基础。该技术需要多学科专业团队协作,整合气象学、空气动力学和工程实践经验,实现风资源的最大化利用。

### 3.2 叶片气动性能提升方案

叶片气动性能优化是提高风能转换效率的核心技术,采用先进翼型设计,优化叶片弦长和扭角分布,提升低风速区间的气动特性。应用边界层控制技术,通过涡流发生器或

襟翼装置延迟流动分离。研发自适应叶片技术,实时调节叶片形态适应风况变化。改进叶尖设计,降低涡流噪声和能量损失。采用新型复合材料,减轻重量同时保证结构强度。定期进行叶片表面维护,保持最佳气动外形。通过风洞试验和数值模拟验证设计效果,确保全工况下的高效性能。气动优化需要平衡效率、载荷和噪声等多重目标,实现综合性能提升。

### 3.3 智能控制系统升级

智能控制系统升级是提升运行效率的关键举措,开发自适应控制算法,实时优化转速和桨距角配合。应用模型预测控制(MPC)技术,提前调整运行参数。部署分布式控制系统,实现各部件协同优化。引入机器学习技术,基于历史数据优化控制策略。升级传感器网络,提高状态监测精度。建立数字孪生系统,模拟验证控制效果。开发抗扰控制模块,降低湍流影响。智能控制系统需要与机组硬件特性匹配,通过持续迭代提升控制性能。该技术可显著提高部分负荷工况下的发电效率,最大化风能利用率。

### 3.4 传动系统效率改进措施

传动系统效率改进直接影响能量转换链的整体效能,优化齿轮箱设计,采用行星轮系结构降低功率损耗。改进轴承布置,减少摩擦损失。应用高效润滑系统,确保各部件良好工作状态。开发直驱系统技术,消除齿轮传动环节。升级发电机设计,提高电磁转换效率。改进冷却系统,维持适宜工作温度。定期进行对中检测,避免附加载荷。传动系统改进需要平衡效率提升与可靠性保障,通过精细化设计和精密制造实现性能突破。该技术可显著降低机械损耗,提高净功率输出。

### 3.5 智慧运维管理系统建设

智慧运维管理系统是保障持续高效运行的重要支撑,部署在线监测系统,实时跟踪关键参数。应用故障预测与健康管理(PHM)技术,提前发现潜在问题。建立数字化运维平台,优化维护计划和资源调度。开发移动巡检应用,提高现场工作效率。构建知识库系统,积累故障处理经验。实施预防性维护策略,避免性能劣化。引入无人机巡检技术,高效评估叶片状态。智慧运维需要与设备特性深度结合,通过数据驱动实现精准维护。该系统可最大限度减少非计划停机,保持机组最佳运行状态。

### 3.6 能效综合评估与持续改进

能效综合评估是优化提升策略的科学基础，建立多维度能效指标体系，全面评价机组性能。开发专用评估软件，自动化处理分析数据。实施标杆管理，对比行业先进水平。开展根本原因分析，定位效率损失环节。建立 PDCA 循环机制，持续优化运行策略。定期发布能效报告，跟踪改进效果。组织技术交流活 动，分享最佳实践。能效评估需要客观公正，基于实测数据形成改进方向。该体系可系统化提升风电场整体运行水平，实现发电效益最大化。

## 4 未来发展趋势

### 4.1 智能化与数字化深度融合

未来风力发电机组运行效率提升将深度依赖智能化与数字化技术的融合创新。人工智能算法将广泛应用于风功率预测、机组控制优化和故障诊断等领域，实现更精准的性能调控。数字孪生技术可构建虚拟机组模型，通过实时数据映射和仿真分析优化运行策略。边缘计算设备的普及使得就地智能决策成为可能，大幅降低通信延迟。区块链技术有望应用于风电场运营数据管理，确保数据真实性和可追溯性。5G 通信网络将支持海量设备数据的实时传输和处理，为智能运维提供基础支撑。这些技术的深度融合将推动风电运行从自动化向真正智能化转变，开创效率提升的新范式。

### 4.2 新材料与新结构创新应用

新材料和新结构设计将成为突破效率瓶颈的关键路径，轻量化复合材料的研发可进一步减轻叶片重量，提高风能捕获能力。自修复材料的应用能自动修复微观损伤，延长部件使用寿命。智能材料如压电材料的引入，可实现结构状态的实时感知和自适应调节。模块化设计理念将简化制造和维护流程，降低全生命周期成本。仿生学原理的应用有望开发出更高效的气动外形，提升能量转换效率。这些创新将突破传统设计局限，为风电设备性能提升开辟全新可能性。未来还将探索 4D 打印技术在风电机组制造中的应用，实现结构形状随环境条件自主调节的功能。纳米复合材料的研发将进一步提升关键部件的机械性能和耐久性。生物可降解材料的应用可降低设备退役后的环境负担。拓扑优化技术的深入应用将实现结构轻量化与高强度的完美平衡。这些前沿技术的融合应用将推动风电机组设计理念的革新，为行业带来革命性的效率突破。

### 4.3 多能互补与系统集成

未来风电效率提升将更加注重系统级优化和多能互补，风光储一体化设计可平抑出力波动，提高电网接纳能力。风电制氢系统的耦合利用，可转化消纳过剩电力。与用户侧灵活资源协同互动，实现源网荷储协同优化。区域多风电场集群控制技术，将有效缓解尾流效应影响。与碳捕集系统结合，提升全系统低碳效益。这些系统集成方案不仅提高单一机组效率，更从能源系统整体角度实现价值最大化，代表未来重要发展方向。此外，多能互补系统还将促进能源结构的优化配置，通过智能调度算法实现各类能源的优势互补。跨区域能源互联技术的应用，将进一步扩大系统集成的规模和效益，为构建新型电力系统提供重要支撑，推动风电在能源转型中发挥更大作用。

### 4.4 全生命周期绿色化管理

效率提升理念将向全生命周期绿色化方向拓展，生态友好型风电场设计减少对自然环境影 响，实现与生态系统的和谐共生。可回收材料的大规模应用，降低设备退役处理难度。绿色制造工艺的推广，减少生产过程中的能源消耗和排放。基于大数据的精准运维，优化备件库存和物流运输。碳足迹全程追踪技术，量化评估减排贡献。这些绿色发展理念将重新定义效率内涵，推动风电行业实现经济效益与环境效益的双赢。

## 5 结束语

风力发电机组运行效率提升策略的持续创新，正在重塑新能源电力生产的效益边界。未来应着力发展基于人工智能的动态优化控制技术，完善考虑环境适应性的多目标协同调控模型。通过技术创新与管理优化的系统集成，将显著提高风能资源利用率，为构建清洁低碳、安全高效的能源体系提供强有力的技术支撑。

### 参考文献：

- [1] 汪祥立. 风力发电仿真平台的设计与试验 [D]. 浙江农林大学, 2024.
- [2] 肖雪. 基于 Bladed 的风电机组转矩寻优控制仿真研究 [D]. 华北电力大学, 2024.
- [3] 杨威. 新能源时代电力电子技术在风力发电中的应用分析 [J]. 电气技术与经济, 2023,(08):54-56.
- [4] 詹政东. 海岛型微电网系统规划与运行控制研究 [D]. 北方工业大学, 2023.

- [5] 桑酉辛 . 计及湍流风速和频敏负荷的发电系统运行可靠性评估 [D]. 太原理工大学 ,2023.
- [6] 程志江 , 王维庆 , 樊小朝 . 微电网系统关键设备及其控制策略 [M]. 重庆大学出版社 :202301.269.
- [7] 吴泽栋 . 基于长短期记忆人工神经网络的风机故障预警研究 [D]. 大连交通大学 ,2022.
- [8] 刘睿 . 液压蓄能式风力发电机转速和低电压穿越的控制方法研究 [D]. 兰州理工大学 ,2022.
- [9] 陈玮 . 直驱型永磁同步风力发电系统主动频率支撑控制技术 [D]. 浙江大学 ,2022.