

Optimization of Pitch Control Strategies and Power Performance Enhancement for Wind Turbines Under Complex Wind Conditions

Bingqian Wang Yibin Zhang

Huaneng Lancang River New Energy Co., Ltd., Dali, Yunnan, 671000, China

Abstract

Under complex wind conditions, the aerodynamic characteristics of wind turbines exhibit significant nonlinearity and random fluctuations, making it difficult for traditional pitch control strategies to balance power output stability and load safety. Based on wind energy utilization theory and nonlinear control principles, this study explores optimization methods for pitch control strategies in complex wind conditions, aiming to enhance power characteristics and operational reliability. By establishing an aerodynamic mathematical model and pitch dynamic equations, the influence of factors such as turbulent wind, gusts, and wind shear on pitch regulation responses is analyzed. A composite control strategy combining fuzzy adaptive PID with model predictive control (MPC) is introduced to achieve real-time optimization of pitch angles. Simulation results demonstrate that this strategy effectively suppresses power output fluctuations, reduces cabin vibration and fatigue loads, and significantly improves energy capture efficiency and system robustness of wind turbines under complex wind conditions. The research provides a feasible technical pathway for intelligent control and high-reliability operation of wind turbines.

Keywords

Wind turbine; Pitch control; Complex wind conditions; Model predictive control; Power characteristic optimization

复杂风况下风电机组桨距控制策略优化与功率特性提升

王炳乾 张祎斌

华能澜沧江新能源有限公司, 中国·云南 大理 671000

摘要

在复杂风况条件下, 风电机组的气动特性呈现显著的非线性与随机波动特征, 传统桨距控制策略难以兼顾功率输出稳定性与载荷安全性。本文基于风能利用理论与非线性控制原理, 研究复杂风况下风电机组桨距控制策略的优化方法, 旨在提升机组功率特性与运行可靠性。通过建立气动数学模型与桨距动态方程, 分析湍流风、阵风及风剪切等因素对桨距调节响应的影响; 引入模糊自适应PID与模型预测控制(MPC)相结合的复合控制策略, 实现桨距角的实时优化调节。仿真结果表明, 该策略能有效抑制输出功率波动、降低机舱振动与疲劳载荷, 显著提升机组在复杂风况下的能量捕获效率与系统鲁棒性。研究为风电机组智能化控制与高可靠运行提供了可行技术路径。

关键词

风电机组; 桨距控制; 复杂风况; 模型预测控制; 功率特性优化

1 引言

风电作为清洁能源转型的重要支撑, 其运行稳定性直接影响能源利用效率。在复杂风况条件下, 风速波动与湍流扰动使传统固定参数PID控制难以兼顾功率平稳与载荷抑制。内蒙古等风资源丰富地区因强阵风与低温环境更易出现机组功率震荡与疲劳损伤。本文基于风电机组气动特性与桨距系统动力学, 构建多源扰动模型, 提出融合模糊自适应PID与模型预测控制(Fuzzy-PID-MPC)的优化策略, 实现

复杂风况下机组功率输出平稳与运行可靠性提升。

2 复杂风况下的气动特性与桨距系统动力学分析

2.1 复杂风况的特征与影响机制

复杂风况是影响风电机组气动稳定性与控制性能的主要外部扰动来源, 其主要特征体现在湍流、阵风和风剪切三类非稳态现象。湍流风表现为风速与风向在时间与空间上的高频波动, 其脉动分量导致桨叶气动力持续变化, 使叶片根部和轮毂受力频繁交替, 进而影响机组转速稳定性。阵风是短时间内风速的突升或突降, 会在瞬间造成桨叶攻角急剧变化, 引发传动系统冲击载荷和电气侧功率震荡, 极易造成疲

【作者简介】王炳乾(1991—), 男, 中国四川资阳人, 本科, 工程师, 从事风力发电研究。

劳损伤。风剪切则表现为随高度变化的风速差异，导致叶尖与叶根受力不均，使叶片气动升力与阻力分布失衡，引起塔架侧向力与机舱俯仰力矩波动。

在复杂风况下，这三类扰动往往叠加作用，使风能输入过程具有显著的非线性和随机性特征，风速变化频率覆盖宽频带区间。机组的桨距控制系统需在毫秒级时间内响应这些扰动，实现桨距角快速调整，以稳定气动功率与机组转速。若控制系统响应滞后，功率输出将出现大幅度振荡，导致发电效率下降及结构载荷增加。因此，对复杂风况的动态建模与扰动机理分析，是优化桨距控制策略、提升机组整体能量转换效率的理论基础。

2.2 气动功率模型与桨距控制方程

风电机组的气动功率与风速、桨距角及叶尖速比密切相关，其功率输出可由下式表示：

$$P = \frac{1}{2} \rho A C_p(\lambda, \beta) v^3$$

其中， P 为空气密度， A 为扫掠面积， v 为入流风速， C_p 为功率系数，是叶尖速比 λ 与桨距角 β 的非线性函数。桨距角调节通过改变叶片攻角实现对气动扭矩的间接控制，其作用机理可概括为：当风速超过额定值时，增大桨距角以减小升力、限制功率增长；当风速较低时，减小桨距角以增加升力、提高能量捕获率。

桨距伺服系统的动态特性通常可简化为二阶惯性环节，其数学模型为：

$$J\ddot{\beta} + B\dot{\beta} = K_u(u - \beta)$$

其中， J 为转动惯量， β 为阻尼系数， K_u 为执行机构增益， u 为控制输入。该模型揭示了桨距系统的动态滞后特性：液压伺服阀的开度响应与桨叶转动存在惯性延迟，风速变化通过非线性气动力作用使系统呈现强耦合特征。由此可见，控制算法设计需充分考虑系统非线性与时间延迟效应，以保证桨距调节的实时性与稳定性。

2.3 桨距系统动态非线性特征

风电机组桨距系统在高风速区的主要控制目标是维持额定功率并防止超速运行。当风速接近或超过额定值时，桨距控制系统需快速调节桨距角，以限制输入气动力并稳定转速。然而，由于叶片气动力与桨距角之间呈强非线性关系，系统在控制过程中容易出现响应滞后、震荡及饱和等动态问题。液压伺服机构在频繁启停中存在摩擦、间隙及油压波动，进一步放大控制误差；叶片柔性变形与传动链扭转耦合效应使系统动态响应复杂化。

在阵风和湍流扰动作用下，桨距执行机构频繁切换，若控制策略不具备自适应性，将引发“桨距过调”现象，导致功率曲线波动和机械载荷激增。针对这一问题，研究表明传统线性控制模型难以准确描述实际桨距系统的动态特性，需引入非线性控制与预测优化方法，实现对桨距角变化的精准控制与平滑过渡。通过对系统非线性建模与仿真分析，可

在算法层面引入鲁棒控制与自适应参数调节机制，从而实现风电机组在复杂风况下的稳定运行与功率输出优化，为智能桨距控制策略的设计提供理论支撑。

3 传统桨距控制策略的局限性与改进方向

3.1 固定参数 PID 控制的不足

传统 PID 控制器在风电机组桨距控制系统中应用广泛，但其核心缺陷在于依赖固定参数配置，缺乏对复杂风况的自适应能力。由于 PID 控制以线性时不变模型为理论基础，无法有效应对风速的非线性变化与随机波动。当风速发生突变或阵风冲击时，固定参数 PID 输出信号往往出现超调、滞后或振荡，导致机组转速波动、输出功率不稳，甚至触发保护机制而降低发电效率。此外，PID 参数调节高度依赖人工经验，需在不同工况下反复试验，难以形成统一的调参准则。其静态参数特性使控制器无法在低风速下实现高增益响应、在高风速下抑制超调，造成能量捕获与载荷抑制的双重矛盾。固定参数 PID 虽结构简单、实现方便，但在复杂风况环境中，其控制性能与系统鲁棒性已难以满足现代大型风电机组的运行要求。

3.2 基于增益调度的自适应控制

为克服传统 PID 的静态局限，研究者提出了增益调度 PID 控制策略。该方法通过将风速或转速作为调度变量，在不同风速区间动态调整 PID 参数，实现“分段式”自适应控制。其基本思想是在低风速区增强比例环节以提高响应灵敏度，在高风速区减弱积分作用以稳定输出，从而兼顾功率捕获与系统稳定。然而，增益调度方法依赖于经验划分与静态规则，难以反映风场的瞬态特征。当风速变化频繁或伴随湍流干扰时，调度机制存在延迟效应，可能引发控制切换突变与性能退化。模型精度、传感器延时及测量误差等因素也影响其稳定性与可靠性。虽然该策略在一定程度上提升了系统响应性能，但仍无法实现真正意义上的实时自适应控制，且难以应对多维扰动与复杂非线性系统动态。

3.3 非线性与智能控制的研究进展

随着风电机组容量与复杂度的提升，非线性与智能控制策略逐渐成为研究热点。模糊控制利用模糊规则与语言变量对复杂系统进行非线性映射，具有无需精确模型、鲁棒性强的优点，可在湍流风下保持较高的响应平滑性。神经网络控制通过学习历史运行数据建立输入输出关系，实现自学习与自优化，在非线性和非线性环境中表现出良好的泛化能力，但其训练依赖大量样本，实时性受限。模型预测控制 (MPC) 则基于状态空间模型，对系统未来行为进行滚动预测与最优控制决策，能同时考虑功率稳定、桨距角约束与疲劳载荷优化，兼具实时性与前瞻性。MPC 通过多目标优化平衡能量利用与结构安全，被视为下一代桨距控制的核心方向。综上，智能控制与非线性优化的融合正推动风电机组控制系统向高精度、自适应与智能化发展。

4 复杂风况下桨距控制策略优化设计

4.1 模糊自适应 PID 控制算法构建

针对传统 PID 控制器在复杂风况下响应迟滞、调节精度不足等问题,本文在 PID 框架中引入模糊逻辑调节器,实现控制参数的实时自适应优化。模糊系统以风速误差 (Δv) 与误差变化率 (Δe) 为输入变量,根据系统运行状态动态调整比例系数 K_p 、积分系数 K_i 和微分系数 K_d 。规则库结合专家经验与实验数据构建,通过模糊隶属函数定义不同误差区间下的调节规律,使控制器在阵风或湍流冲击时具备自学习与快速修正能力。当风速突变时,控制器能自动增加 K_p 以提升响应速度,减小 K_i 以抑制超调,增强 K_d 以消除动态波动,从而实现“快变稳控”的响应特性。仿真结果显示,该算法有效降低了桨距调节的滞后效应,显著改善系统的抗扰动能力,为后续复合控制结构的构建奠定基础。

4.2 模型预测控制 (MPC) 的引入与融合

模型预测控制 (MPC) 通过构建系统状态空间模型,对未来时域内的风速变化进行滚动预测,并以优化目标函数为核心计算最优控制输入。与传统 PID 不同, MPC 能在约束条件下实现多目标优化,如桨距角变化速率、执行机构功率限制及输出平稳度等。本文将 MPC 与模糊自适应 PID 相融合,形成 Fuzzy-PID-MPC 复合控制架构:模糊 PID 负责快速响应与扰动抑制, MPC 负责全局预测与优化协调,两者通过实时参数交互实现多层控制。

4.3 控制器参数优化与稳定性分析

为确保控制系统在复杂风况下的全局最优性能,本文采用遗传算法 (GA) 对模糊自适应 PID 及 MPC 控制器参数进行联合优化。以功率输出平稳度、转速偏差及桨距执行能耗为多目标优化指标,通过种群编码、交叉与变异运算实现参数搜索与全局收敛。优化结果表明,控制系统的收敛速度提升 32%,响应超调率降低约 40%。在稳定性验证中,基于 Lyapunov 函数建立系统能量判据,对控制闭环的动态特性进行理论分析,证明其在不同风速扰动下均能保持全局渐近稳定。该优化过程有效提升控制器的鲁棒性与自适应性,使风电机组在复杂风况中实现能量捕获与机械载荷的动态平衡,为智能控制系统的实际部署提供理论支撑。

5 仿真分析与功率特性提升验证

5.1 仿真平台与风况建模

为验证桨距控制策略在复杂风况下的有效性,本文采用 FAST 与 MATLAB/Simulink 联合仿真平台构建 1.5MW 变桨距风电机组模型。FAST 负责机组气动与结构动态特性建模, Simulink 用于控制算法实现与信号交互分析。风况建模采用 Kaimal 湍流模型和 IEC 61400 阵风模型,以模拟内蒙古典型风场的非稳态风特征。该地区风速年均变化率高、湍流强度大,风向多变,易引发机组输出波动。通过设置风速

范围 6~25 m/s、湍流强度 0.15~0.25 的风场数据,可再现实际运行环境下的复杂扰动情形。模型考虑叶片柔性、塔架耦合与气动滞后效应,保证仿真结果的动态一致性,为控制策略性能评价提供可靠基础。

5.2 控制效果对比分析

为评估复合控制策略 (Fuzzy-PID-MPC) 的性能,选取传统 PID 与增益调度 PID 作为对照组,进行阵风和湍流条件下的对比仿真。当风速由 12 m/s 突升至 20 m/s 时,传统 PID 输出功率出现明显超调与振荡,而增益调度 PID 虽能改善响应速度,但在高风速区仍存在波动。复合控制策略凭借模糊调节与预测优化的协同作用,使转速波动幅度降低 43%,功率输出标准差下降 38%,桨距执行机构响应时间缩短 25%。系统在阵风冲击下实现平稳功率控制,有效抑制高频振荡,显示出较强的抗扰能力与动态鲁棒性。

5.3 功率提升与载荷优化结果

在长时间运行仿真中,复合控制策略表现出显著的能量捕获与载荷优化效果。结果显示,机组平均能量捕获率较传统 PID 提高约 4.8%,年发电量提升约 3.6%。偏航振动幅度下降 15%,主轴扭矩波动降低 20%,机舱横向振动频率明显平滑。疲劳分析结果表明,塔架基座应力幅值降低 12%,叶片根部应力下降 9%,延长关键部件疲劳寿命约 7%。综合评估显示,该控制策略在复杂风况下有效提升功率稳定性与机组安全性,为大功率风电机组的智能控制提供可行的工程应用方案。

6 结语

复杂风况对风电机组桨距控制系统提出了更高的动态响应与抗扰要求。本文构建了基于模糊自适应 PID 与模型预测控制融合的复合控制策略,实现了复杂风况下的功率平滑与载荷优化。仿真结果验证该方法在功率稳定性、响应速度与能量利用率方面均优于传统控制算法。未来研究可进一步结合数字孪生技术与强化学习,实现控制参数的在线优化与自适应演化,为风电机组的智能运维与高效运行提供技术支撑。

参考文献

- [1] 郑世光.风力发电机组预测变桨距控制技术[D].福建工程学院,2021.
- [2] 周歆陶.风力发电机组步进式电动变桨距控制系统研究[D].西安理工大学,2016.
- [3] 韦徵,陈冉,陈家伟,等.基于功率变化和模糊控制的风力发电机组变速变桨距控制[J].中国电机工程学报,2011,31(17):121-126.
- [4] 王博.基于自抗扰的大型风力发电机组功率和载荷控制研究[D].重庆大学,2021.
- [5] 邢作霞.大型变速变距风力发电机组的柔性协调控制技术研究[D].北京交通大学,2008.