

# 风力发电自动化控制系统中 智能化技术的应用

袁宋玉

(国家能源集团国源电力有限公司内蒙古分公司, 内蒙古 呼和浩特 010000)

**摘要** 风力发电作为新能源技术体系的关键支撑, 正深刻而长远地影响着全球能源格局的演变。近年来, 智能化技术与风电领域的深度融合实现了显著突破, 既有效优化了机组运行效率, 又依托智能化故障预判与运维体系, 大幅降低了运维投入, 为电网运行的安全性与稳定性提供了有力支撑。基于此, 本文系统梳理了智能化技术在风电自动化控制系统中的应用价值, 重点探究其在风电机组自动控制中的具体实施路径, 以期为提升设备利用率与能源转化效率、压降运维成本、延长设备服役周期提供参考, 进而促进风电产业可持续发展。

**关键词** 风力发电; 自动化控制系统; 智能化技术

**中图分类号**: TM61; TP27

**文献标志码**: A

**DOI**: 10.3969/j.issn.2097-3365.2025.34.011

## 0 引言

面对全球能源供需矛盾加剧与气候变化挑战凸显的双重压力, 开发利用可再生能源已上升为国际社会共同行动方向, 风能作为典型的清洁可再生能源, 风电发展不仅创造了突出的环境效益, 其应用场景更随着技术进步持续拓展。值得关注的是, 风力发电机组的高效稳定运行, 离不开智能化控制技术的深度赋能, 与此同时, 碳排放配额机制的落地, 进一步抬高了风电产业的绿色发展标准。在此背景下, 如何通过智能调控手段提升发电效能、降低单位电量碳排放量, 成为助力碳减排目标达成的关键问题, 亟需开展系统性研究。

## 1 风力发电机组概述

### 1.1 风力发电机组运行原理

风力发电机组的核心是将空气流动的动能转化为电能, 其能量传递遵循明确的技术路径, 风作用叶片产生气动推力, 推动叶片绕主轴旋转。此过程完成风能向旋转机械能的初步转换, 旋转的主轴通过联轴器将扭矩传递至增速传动装置, 通常为多级齿轮箱, 经增速后将低转速提升至发电机适配的高转速, 发电机基于电磁感应原理, 将输入的机械能转化为三相交流电输出, 依赖集成化的监控系统实时调节运行参数, 维持机组稳定工况<sup>[1]</sup>。

### 1.2 风力发电机组构成

风力发电机组的组成包括诸多部件, 具体包括以下几个部分: 一是叶片, 其主要是进行能量捕获, 依

托于空气动力学进行风能的获取, 并进行扭矩的传递。二是传动链系统, 该系统主要包括主轴、齿轮箱等, 其作用在于将叶片的低速旋转转变为发电机所需的转速, 实现转速的动态调整以发电。三是发电机, 发电机的作用在于可以将机械能进行转换, 转变为系统所需电能。现阶段发电机包括两类, 分别是双馈异步发电机以及永磁同步发电机。四是控制系统, 控制系统内置传感器、控制器以及其他的执行机构, 主要是对系统的工况进行动态监测, 并进行参数的有效调节。一旦发生故障, 也可以第一时间发出响应。五是支撑结构, 该结构包括塔架和结构基础, 共同承担机组的运行载荷, 保证系统运行的稳定性及可靠性。

### 1.3 风力发电机组控制系统

在风力发电控制系统的运行过程中, 其具有的功能包括以下几个方面: 一是状态感知, 依托于传感器的有效运用, 进行转速、功率、电压、温度等数据参数的实时采集。二是动态调节, 综合系统获取的风向和风速数据信息, 利用变桨执行机构进行叶片桨距角的有效调整, 以确保机组运行的稳定性, 始终保持在最优功率曲线区间内。三是故障管理, 通过对系统运行异常参数的全方位监测, 一旦发生故障也可以触发停机和降载保护指令, 有效规避故障问题的扩大, 引发重大安全问题。四是数据交互, 将系统中存储的数据传输到监控平台, 对数据进行全方位分析, 掌握故障发生的原因, 并提供优化建议。五是电网协同, 通过对接通信接口和电网调度系统, 可以严格依照系统

发出的指令输出有功和无功，以适应系统的并网需求。

## 2 风力发电自动化控制系统中智能化技术的应用价值

### 2.1 优化生产效能，提升电能质量

风力发电自动化控制系统引入智能化技术后，依托对风电机组运行状态的实时动态追踪，可实现对机组性能的自适应优化，这一技术赋能下，风机能随外界风速变化自动匹配最优运行参数，切实增强了机组运行效率与输出电能的稳定性。从风电场整体运营视角看，智能化技术还能针对风机空间布局、功率输出曲线等关键环节实施精细化调节，进一步挖掘发电潜力、提升经济收益，为风电场长期高效稳定运行注入强劲动力<sup>[2]</sup>。

### 2.2 降低运维成本，增强作业安全性

传统风电机组运维多依赖人工巡检，不仅耗时长、劳动强度大，故障判别准确性也常受限于经验判断，智能化技术的融入，使风电机组预知性养护成为可能，通过全天候采集分析机组运行数据，智能系统能提前识别潜在故障征兆并发出预警，大幅降低突发故障引发的意外停机风险，进而有效控制运维投入。此外，智能化技术还可联动无人机等智能装备执行日常巡检任务，既提升了巡检覆盖面与效率，又避免了人员攀爬塔架等高危操作，显著降低了现场作业安全隐患。

### 2.3 适配新型电力系统，拓展市场价值边界

智能化技术助力风电深度融入新型电力系统，通过AI算法融合多源数据实现高精度功率预测，平抑出力波动，降低并网冲击。依托虚拟电厂技术聚合分散机组与储能资源，参与电网削峰填谷及辅助服务，提升消纳能力。同时精准捕捉市场价格波动，优化交易策略，规避偏差考核风险，拓展绿电交易与辅助服务盈利渠道，推动风电从单一发电主体向综合能源服务商转型，释放多元市场价值。

## 3 风力发电自动化控制系统中智能化技术的应用策略

### 3.1 功率预测与智能调度优化

风力发电作为新能源发电体系的重要支撑，其出力表现易受外部工况显著影响，若缺乏对未来气象条件的精准预判并动态调整调度方案，不仅会加剧电力资源损耗，更可能因机组出力无序波动冲击电网稳定，严重时甚至引发设备故障，扩大为区域性供电中断<sup>[3]</sup>。其一，搭建高精度气象预演框架，夯实功率预估基础，通过整合多源气象数据构建天气预报模型，对特定时

段内的气象要素进行周期性推演，进而实现对单台机组乃至全场风电出力的预判。这类预测结果将直接服务于调度策略制定，实时同步至电网调度系统，助力提前采取应对措施，降低运行风险，具体需聚焦模型构建、动力集成预测及短期风速预判三大技术节点。其二，完善风电场运行特性建模，针对自然风况中的风速、风切变等核心参数，以及尾流效应、极端载荷等特殊场景，需建立针对性仿真模型，风电场整体模型包含自然风场模式与风切变模式。前者综合基本风、阵风、随机扰动及渐变风等多元因素，假设时段内平均风速稳定，呈现相对平稳的特性；后者侧重描述静风条件下，不同海拔高度的平均风速变化规律，受地面摩擦、环境温度等因素影响，气流速度随海拔升高呈现差异化分布。其三，强化动力集成预测效能，通过融合数值模式输出与实际观测数据，修正模式预测的气象要素均值偏差，具体分为两步：首先，基于多元线性回归算法开展数值比对分析，自动识别并修正模式误差，定期更新统计参数；其次，优化混合系数，动态调整各模式因子与观测值的权重分配，逐步缩小零时预测误差。其四，融合前沿算法提升短期风速精度，在现有气象模式基础上，引入机器学习、动态集成预测等技术，对未来时段机组出力进行精细化预判，这类高精度预测结果可为自动化控制系统提供调度决策依据，推动电力资源优化配置与高效利用<sup>[4]</sup>。

### 3.2 智能控制

依托智能算法与模型的调控手段，能显著提升机组运行效率与管理水平，已成为风电智能化发展的核心方向，通过持续采集并分析实时运行数据，系统可精准感知机组工况，针对性输出控制指令，实际应用中，需结合机组类型（固定桨距失速型、可变桨距型、变速恒频型）的特性，设计差异化控制逻辑。针对固定桨距失速型风机，当实际风速突破安全阈值时，系统触发失速保护机制，通过调整桨叶角度限制过载，同时利用气动特性优化能量捕获，避免无约束运行导致的设备损伤，根据桨距角与失速风速的关联特性，适度增大桨距角可进一步提升出力效率。对于可变桨距风机，重点在于动态调整功率特性以实现最优分配，当风速超设定值时，机组切换至启动、矢量控制及额定功率三种模式：启动阶段桨距角设为0度以快速建立初始转矩；进入运行期后，速度控制器实时调节桨距角，缩短并网时间，保障发电连续性。变速恒频风机的控制更为复杂，采用主控制器+转矩控制器+俯仰控制器协同架构：主控制器统筹全局逻辑，协调偏航、解缆等关键操作；转矩控制器以变速恒频为目标，根

据实时风速调整发电机与风轮转速，匹配最大升力桨距角，最大化风能利用效率；当风速超额定值时，变桨机制介入，维持功率输出稳定；风速偏离额定区间时，通过变桨策略平衡捕获效率与功率限制需求<sup>[5]</sup>。

### 3.3 智能巡检

随着国内风电场建设规模持续扩大，场内风机及配套设备数量庞大，传统人工巡检模式的局限性愈发突出，检测频次不足、响应滞后的问题，不仅延长了设备故障持续时间，还可能加重设备损耗，甚至诱发连锁故障，加之行业普遍推行无人值守运营模式，依赖人力定期巡查的方式更难适配实际需求，企业运维成本始终处于高位，为破解这一难点，智能巡检体系的构建成为关键。具体实践中，可引入搭载多类传感器及高清摄像设备的无人机作为巡检载体，运维人员仅需在管理平台设置巡检任务，系统便会自主规划最优路径，同步实现远程作业监控、日常与环境状态监测，以及异常信息的集中采集，遇突发状况时，系统会快速触发预警，确保问题第一时间被捕捉。为进一步提升智能巡检的效率与精准度，重点应用了自动避障与 AR 可视化两项核心技术，自动避障功能依托激光测距与自主导航系统协同工作，能在设定安全阈值内主动规避障碍物，动态调整飞行轨迹，避免因碰撞引发设备损伤，AR 可视化技术则借助空间定位与图像叠加，将巡检现场转化为直观的三维视图，辅助运维人员结合智能分析结果开展人工复核，大幅提高了故障判定的准确率。同时，巡检数据可自动同步至系统知识库，为后续故障诊断模型优化提供支撑，相较以往依赖文字或图表的统计汇报，这种立体化呈现方式让现场状态一目了然，助力人员快速锁定异常点并启动处置流程，真正实现了巡检从被动记录到主动预警的升级。

### 3.4 故障自愈

近年来，随着风电场单机容量与机组数量持续攀升，新一代风电机组的故障频发问题愈发突出，设备异常不仅威胁运行稳定性，更推高了运维成本、拉低发电效率，加速了机械部件损耗，针对这一行业痛点，亟需依托智能化技术构建故障自主修复系统，核心目标是通过精准识别与快速响应，最大限度降低人工干预依赖。该系统的运行逻辑可概括为感知、诊断、处置、进化闭环。

基于 BP 神经网络实时追踪机组状态，一旦捕捉到温度、振动或电压异常等信号，立即触发初级筛查程序，将可疑数据推送至智能诊断模块，此模块融合大数据分析 with 深度学习算法，既参考实时监测数据，又调用历史故障样本库，逐层剖析故障诱因并锁定具体部件，

最终生成包含故障等级、影响范围及处置优先级的详细报告。根据诊断结果，系统会自动匹配差异化处置方案，对线路接触不良、传感器信号漂移等暂时性问题，通过远程调控完成参数校正或部件重启，最快可在分钟级恢复运行；针对齿轮箱缺油、冷却系统失效等可自主干预的故障，触发自动补油、回路切换等预设流程，阻断故障蔓延；至于轴承严重磨损、发电机线圈烧毁等不可逆损伤，系统会先隔离故障单元，同步启动备用设备保障供电连续性，同时向运维中心发送含故障定位、诊断结论及维修建议的预警，并自动生成检修工单，精准调度人员携带专用工具到场。

该系统具备显著的自我进化能力，在完成每次故障处置后，可将完整的故障处理流程以标准化案例形式纳入系统知识库，并基于案例数据实现诊断模型与修复策略的动态迭代优化，持续提升故障处理效率与精准度。为全面强化系统运行可靠性，未来需深化数字孪生技术的融合应用，依托物理机组与虚拟镜像的实时数据交互，构建全场景故障模拟环境，为处置策略的优化完善提供科学决策支撑。同时，建议在机组关键区域部署边缘计算节点，有效降低云端数据传输延迟，即便遭遇极端天气、通信中断等突发状况，也能实现故障的毫秒级响应与闭环管理，最大限度减少对发电效率的不利影响。

## 4 结束语

在风电领域中，运用智能化技术已成为必然趋势，推动了风电系统的智能化转型。这一变革过程除了体现在成本优化和运营效率的提升两个方面，更重要的是电力系统的协同模式得到全面重塑，形成了智能化的运营体系，风机运维效率更高。这也是我国风电产业转型升级、实现高质量发展的核心。未来，随着人工智能技术的日益发展，风电产业将迈入新阶段。

## 参考文献：

- [1] 朱建成. 人工智能+背景下的风力发电技术探析[J]. 电力设备管理, 2024(24):129-131.
- [2] 杨森. 人工智能技术在风力发电领域的应用[J]. 光源与照明, 2024(11):243-245.
- [3] 邓银辉. 风力发电技术与功率控制策略[J]. 电力设备管理, 2024(21):89-91.
- [4] 姚建国. 智能化技术在风力发电自动化控制系统中的应用[J]. 产业科技创新, 2023,05(04):65-67.
- [5] 田晓鹏, 邵雅宁, 张峰, 等. 新一代人工智能在新能源领域中的典型应用场景分析[J]. 电气时代, 2022(05):70-73.