

# 风电发电机组电气控制系统优化设计与性能分析

曹哲菲

华电新能源集团股份有限公司山西分公司, 山西 太原 030024

DOI:10.61369/WCEST.2026040018

**摘 要 :** 风电能源作为清洁能源的重要组成部分, 在国家能源结构转型进程中占据核心地位。电气控制系统是风电发电机组的核心枢纽, 直接决定机组运行稳定性、发电效率与安全防护水平。传统风电电气控制系统长期应用于复杂野外工况, 逐渐暴露出控制响应滞后、调节精度不足、抗干扰能力薄弱、动态适配性差等诸多问题, 无法适配现阶段风电高效稳定运行的发展需求。本文深入剖析系统运行现存各类缺陷, 从控制策略、硬件配置、软件算法、保护机制、通信架构多个维度开展优化设计, 通过多角度性能测试与数据分析验证优化成效, 有效提升机组发电质量与运行可靠性, 为风电控制系统升级改造提供可靠的技术参考。

**关 键 词 :** 风电发电机组; 电气控制系统; 优化设计; 性能分析

## Optimization Design and Performance Analysis of Electrical Control System for Wind Turbine Generators

Cao Zhefei

Shanxi Branch of Huadian New Energy Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi 030024

**Abstract :** As a crucial component of clean energy, wind power energy plays a pivotal role in the national energy structure transformation process. The electrical control system serves as the core hub of wind turbine generators, directly determining the operational stability, power generation efficiency, and safety protection level of the units. Traditional electrical control systems for wind power have been applied in complex field conditions for an extended period, gradually revealing numerous issues such as delayed control response, inadequate adjustment accuracy, weak anti-interference capability, and poor dynamic adaptability, failing to meet the current development requirements for efficient and stable wind power operation. This paper conducts an in-depth analysis of the existing defects in system operation and carries out optimization design from multiple dimensions, including control strategies, hardware configurations, software algorithms, protection mechanisms, and communication architectures. The optimization effectiveness is validated through multi-angle performance testing and data analysis, effectively enhancing the power generation quality and operational reliability of the units, providing reliable technical references for the upgrading and transformation of wind power control systems.

**Keywords :** wind turbine generators; electrical control system; optimization design; performance analysis

### 引言

在双碳战略全面推进的大环境下, 清洁能源替代传统化石能源已经成为能源行业发展的主要方向, 风电由于绿色低碳、储量丰富、开发成熟等优势, 成为了新能源发电的主要支柱。风电发电机组长期在户外工作, 受到风速随机变化、气候环境复杂、电网工况多变等诸多问题的困扰, 对于电气控制系统而言, 需要达到很高的实时性、稳定性和抗干扰能力。电气控制系统担负着机组启停、转速调节、变桨控制、并网发电、故障防护、数据监测等一系列重要的任务, 是保证风能有效转化、风电机组安全运转的主要承载者。传统的控制系统设计方案比较保守, 控制模式固定、硬件性能落后、智能算法缺乏, 容易造成功率波动、并网不稳定、设备故障等问题, 影响风电发电效率的提高。根据行业的发展需要, 对风电发电机组电气控制系统的优化设计及性能进行研究分析, 对于推进风电设备的智能化升级, 提高新能源发电质量有着十分重要的工程实践意义。

## 一、风电发电机组电气控制系统现存问题

### （一）控制策略适配性较差

目前，大部分风电发电机组采用传统的固定参数控制策略，控制逻辑固定，不能适应复杂的多变野外风速工况。自然风速具有随机性、突变性、不稳定性特点，传统的控制方法不能根据风速的变化情况及时地调节控制参数。低风速时系统不能很好地跟踪最大功率点，风能利用率低。高风速工况下，功率限幅控制过迟，很容易使输出功率超过额定值。传统的控制大多使用常规的 PID 算法，动态响应速度慢，抗扰能力差，在遇到风速突变、电网电压波动等扰动时很容易出现叶轮转速震荡、输出功率波动、并网不稳等问题，严重影响机组运行稳定性。

### （二）硬件设备整体性能偏低

早期投运的风电发电机组电气控制硬件设备存在老化滞后、性能不足的现象。核心处理器运算能力低，数据处理速度慢，无法支持高精度、复杂的智能控制算法的运行，控制指令输出有延迟。各种工况传感器精度低，抗环境干扰差，在高温、潮湿、沙尘、强电磁的野外环境下工作，采集的风速、转速、电气参数有较大的误差，影响控制的准确性。变流器、接触器、功率开关等功率器件损耗大，散热结构简单，长时间高负荷工作容易造成发热过载、器件老化损坏等问题。整体的硬件防护等级不高，环境适应性差，设备的故障率很高。

### （三）软件控制算法更新滞后

传统的风电电气控制系统软件体系更新换代速度慢，主要的控制算法比较落后，智能化程度低。系统内置的数据滤波算法简单单一，不能有效地去除野外环境造成的干扰数据，原始数据噪声大，造成控制决策的偏差。故障诊断算法只能识别出超速、短路等明显的故障，对于设备的隐性老化、参数漂移、轻微的电气异常等隐患不能进行有效的识别，缺少了故障预警预判的能力。控制程序逻辑复杂，存在很多冗余指令，指令响应速度慢，通用性差，只能适应固定的机型和工况，不能根据机组运行情况灵活调节控制参数，难以满足风电智能化、精细化运行的要求<sup>[1]</sup>。

## 二、风电发电机组电气控制系统优化设计

### （一）自适应控制策略优化设计

本文根据传统控制策略的适配性差、响应慢的特点，对自适应模糊 PID 控制策略进行改进，代替传统的固定参数 PID 控制模式。根据实时采集的风速、转速、功率、电压等数据来动态调节 PID 的比例、积分、微分参数，提高系统的动态响应能力和抗干扰能力。细化分段控制逻辑，在低风速区间采用最大功率点跟踪控制，精确捕捉风能峰值，提高风能利用率。高风速区间切换恒功率稳压控制，防止机组输出过大造成过载，保证发电功率的稳定性。增加工况预测，根据短时风速变化趋势提前发出变桨、调速命令，减少风速突然变化造成的功率振荡、转速波动，达到全工况精准控制的目的。

### （二）系统硬件配置升级设计

根据机组运行存在的问题进行全方位的硬件升级优化，提高系统的硬件运行性能和环境适应性。更换高性能嵌入式核心处理器，大幅提高数据运算速度和指令处理速度，满足智能算法运行

的要求。全部用高精度抗干扰传感器代替原有传感器，改进传感器安装固定结构和屏蔽设计，消除环境干扰，提高工况数据采集的准确性。升级低损耗大功率功率器件，改善设备散热结构，增设智能散热模块，减小设备运行温升和功率损耗。提高所有硬件设备的防护等级，用防尘、防潮、防雷击、抗电磁干扰一体化的设计来适应野外复杂的工况，延长硬件设备的使用寿命，降低设备故障率。

### （三）智能软件算法优化设计

对控制系统软件体系和核心算法进行全方位的更新换代，提高系统的智能化程度。用卡尔曼滤波算法代替传统的简单滤波算法，有效地剔除环境干扰噪声，提高了原始数据的精度，给控制决策提供准确的数据支持。改进故障诊断算法，创建多参数融合的诊断模型，将电气参数、设备温度、运行转速、风速工况等各方面的数据结合起来，从而达成显性故障快速识别和隐性故障提早警报的目的。简化系统程序的冗余逻辑，改善指令的执行流程，减小系统的响应时间。开放参数自定义调节端口，满足不同机型、不同工况的运行要求，提高控制系统通用性和灵活性，达到软件系统精细化控制的目的。

### （四）分级故障保护机制设计

创建三级分层的故障保护体系，由原来的被动停机变成主动防范，加强系统的安全防护水平。划分预警防护等级，对参数轻微异常、设备性能偏离正常范围等隐患，立即发出预警信息，使运维人员及时进行隐患排查。设置轻故障调节层级，对小幅电压波动、轻微功率偏移等可控异常进行自动修正，消除故障隐患，不需要停机，保证机组连续发电。设置重故障隔离层次，对短路、超速、严重过压等高危故障进行快速断电，执行紧急停机操作，彻底隔离故障区。在原有基础上加入动态阈值调节、故障溯源模块，按照工况变化自动改变保护参数，并且保存整个故障的记录过程，为故障分析和整改提供可靠的依据。

### （五）双向通信架构优化设计

重构系统通信架构，用有线主干和无线辅助的双向融合通信方式提高数据传输的稳定性、实时性。核心控制模块之间用工业以太网通信，提高通信带宽和传输速率，减小数据延迟。偏远监测点使用加密无线通信方式，缩减布线结构，削减线路故障危险。全部更换高屏蔽通信线缆，加强电磁防护设计，提高野外强电磁环境下抗干扰的能力。统一全域通信协议以达到消除设备兼容性差异、改善数据交互目的。设置双链路通信冗余备份，当主链路出现故障时会自动切换到备用链路，从而完全消除因为链路中断或者数据丢失所引起的各种问题，保证各个控制模块之间可以顺畅地协调工作<sup>[2]</sup>。

## 三、优化后系统性能分析

### （一）动态响应性能分析

经过仿真对比及现场实试验证可知，改进后的控制系统动态响应情况有了明显的提高。自适应模糊控制策略可以快速适应风速变化的情况，风速突然变化时，系统指令的响应速度大大加快，叶轮转速的振荡幅度和输出功率的振荡幅度都明显减小。在低风速工况下，最大功率点跟踪精度得到明显改善，风能的捕捉效率得到提高，很好地解决了传统机组低风速发电利用率低的问题。

题。高风速工况下恒功率控制反应快、功率输出稳定、无过载波动。系统动态适应性、抗干扰性比传统系统全面提高，可以很好地适应复杂的多变野外风况。

（二）并网电能质量分析

经过改进的变流器控制精度大大提高，机组并网电能质量得到改善。系统的输出电压、频率的稳定性得到了很大的提高，波动范围也被严格地控制在行业标准内。智能算法可以很好地抑制谐波干扰，机组运行总谐波畸变率大大降低，完全满足电网并网规范。机组运行功率因数一直维持在高位，无功功率损耗大幅度降低，电能利用率大大提高。经过优化的控制系统很好地解决了传统机组并网波动、谐波超标、功率因数偏低等问题，大幅度降低了风电并网对电网的冲击，提高了电网的适应性<sup>[3]</sup>。

（三）整机运行稳定性分析

经过硬件升级、算法改进之后，整机运行稳定性大大提高。高精度传感器可以有效地避免环境干扰，数据采集的误差大大减小，给精确控制提供可靠的保证。硬件设备损耗减少、散热效果提高，设备老化速度变慢，日常故障率大幅下降。智能滤波和精确调节降低系统误操作、异常工况，使机组连续稳定运行时间大大延长。分级保护机制可以有效地避免各种故障风险，减少不必要的停机操作，机组发电的连续性大大提高，彻底解决了传统系统运行不稳定、故障多的缺点。

（四）故障防护性能分析

分级故障保护体系落地运行之后，系统安全防护能力得到全方位的提升。预警层级可以早发现设备的隐性隐患，从而大大减少由于突然出现故障而造成的损失。轻故障自动调节功能可以快速修正小幅的异常，保证机组不停机连续运行，提高发电时长。重故障响应快、隔离彻底，完全防止故障蔓延造成二次损坏。故障溯源模块可以完整地保存故障数据以及运行状态，给设备检修、故障整改、系统迭代优化提供准确的数据支持。整体防护体系兼顾了安全性和经济性，较好地解决了机组安全运行和高发电之间的矛盾。

（五）通信运行可靠性分析

优化后融合通信架构运行稳定可靠，数据传输性能有较大提高。工业以太网高速传输可以有效地减小数据延迟，控制指令的实时性完全满足机组运行的要求。双链路冗余备份机制彻底解决了通信中断、数据丢失的问题。加强屏蔽可以很好地抵抗野外电磁干扰，提高数据传输精度。统一的通信协议使各个模块之间可以高效地进行数据交换，整机协同控制能力大大增强，系统运行流畅度和联动性得到全方位的改善，为机组智能化、精细化运行提供稳定的通信支持<sup>[4]</sup>。

四、系统优化实施保障措施

（一）严格开展仿真与现场测试

系统优化设计完成后，就要依靠专业的仿真平台做全工况模拟测试，包含各种风速、各种负荷、各种电网工况等各方面，对控制策略、算法逻辑、保护机制等进行全方位的检验和评价。仿真测试合格之后，对小范围的现场进行试点试运行，不断收集运行数据，对比优化前后性能的差别，及时发现设计缺陷和程序错误，保证优化方案适应现场实际情况，使系统优化效果稳定可靠。

（二）规范设备安装与系统调试

硬件升级过程中严格按照行业技术标准和设备安装规范进行，规范线路布置、设备固定、屏蔽防护和散热安装，防止由于安装不符合要求而造成的设备隐患。系统调试采取分步调试、分级联调的方式，先做单体设备调试，再做模块联调和整机统调，准确校准各种运行参数、控制阈值和通信配置，保证优化后的各个模块协同稳定运行。

（三）完善常态化运维管理机制

创建与系统适配的常态化运维管理制度，定时对硬件设备进行巡检，对传感器实施校准，对通信链路展开检测，迅速找出设备老旧、线路破损、参数偏移之类的隐患。定期对程序做系统性的升级、对算法做相应的更新，根据季节变化、运行数据改变控制参数。创建完备的运维台账，记载机组运行数据、故障状况及整改结果，塑造起运维闭环体系，始终保持系统最佳运转状况<sup>[5]</sup>。

五、结论

风电发电机组的电气控制系统，是保证风电发电机组安全稳定运行和提高风能利用率的重要组成。传统控制系统存在着控制策略不匹配、硬件性能落后、智能算法过时、保护功能欠缺、通信稳定性差等众多问题，不能适应复杂的野外环境以及高品质并网的要求。本文采用自适应控制策略的改进、硬件设备的升级、智能软件算法的迭代、分级故障保护体系的建立、融合通信架构的重构，对电气控制系统进行全方位的升级改造。经过性能分析可知，优化后的系统动态响应速度、电能质量、运行稳定性、故障防护能力、通信可靠性都有了明显提高，大大降低了机组的故障率，提高了风能的捕获效率和发电质量。本次优化设计符合风电机组实际运行工况，可以有效地改善传统系统存在的不足，真正为风电发电机组电气控制系统升级和高质量运行提供可靠的保障。

参考文献

[1] 李梦杰, 谢震, 高翔, 等. 弱电网下双馈风电机组混合功率同步控制策略及稳定性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(21): 8388-8399.  
[2] 关超. 变频技术在风力发电机组及电气系统中运用分析 [J]. 电气技术与经济, 2024(24): 67-69.  
[3] 陈月. 风电领域高效风力发电机叶片结构优化设计与动态性能分析 [J]. 机电工程技术, 2025, 54(8): 182-185.  
[4] 韩建涛. 风力发电系统优化设计与性能评估研究 [J]. 电力设备管理, 2025(15): 103-105.  
[5] 郭亮, 李建伦, 张乐平. 风电机组轴系优化对发电性能的影响分析 [J]. 科技创新与应用, 2023, 13(24): 105-108.