

电力技术

新能源风电设备性能提升技术研究

张海军

国华（沽源）风电有限公司 075000

【摘要】在新能源行业快速发展的背景下，风力发电作为清洁能源的重要组成部分，其设备性能直接影响发电效率与稳定性。本文聚焦风力发电机组相关电气控制理论，结合新能源行业设备管理实际，针对电气设备管理及性能提升展开研究。深入分析当前风电设备电气系统存在的性能问题，从电气控制优化、设备状态监测、故障诊断、协同运行等多个维度提出具体的性能提升技术，结合实际应用案例阐述技术实施效果，旨在为新能源行业设备管理提供切实可行的技术参考，助力风电设备高效稳定运行，推动风力发电行业的高质量发展。

【关键词】新能源；风电设备；性能提升；电气控制；电气设备管理；协同运行

Research on Performance Enhancement Technologies for New Energy Wind Power Equipment

Zhang Haijun

Guohua (Guyuan) Wind Power Co., Ltd. 075000

【Abstract】Against the backdrop of rapid development in the new energy sector, wind power generation, as a crucial component of clean energy, directly impacts power generation efficiency and stability through equipment performance. This study focuses on electrical control theories related to wind turbine systems, integrating practical equipment management practices in the renewable energy industry to explore improvements in electrical equipment management and performance. It conducts an in-depth analysis of existing performance issues in current wind power equipment electrical systems, proposing specific enhancement techniques from multiple dimensions including electrical control optimization, equipment condition monitoring, fault diagnosis, and coordinated operation. Practical application cases demonstrate the effectiveness of these technologies, aiming to provide actionable technical references for equipment management in the new energy industry. These efforts contribute to efficient and stable operation of wind power equipment while promoting high-quality development in the wind power sector.

【Key words】New energy; Wind power equipment; Performance enhancement; Electrical control; Electrical equipment management; Coordinated operation

引言

随着全球能源结构向低碳转型的步伐不断加快，风力发电凭借其可再生、无污染的显著优势，在全球能源供应体系中的占比持续攀升。风力发电机组作为风电系统的核心设备，其电气系统涵盖发电机、变流器、控制系统等关键组成部分，这些电气设备的性能直接决定了风力发电的效率、运行的安全性以及设备的使用寿命。

当前，在新能源行业设备管理实践中，风电设备长期面临着野外复杂工况带来的诸多挑战，性能衰减、故障频发等问题较为突出。特别是电气设备，如变流器在高频开关操作和恶劣环境影响下出现的绝缘老化，发电机因长期运行导致的绕组性能下降，控制系统在复杂工况下的响应滞后等，不仅严重影响了风电项目的经济效益，也对电网的稳定运行构成了潜在威胁。

基于风力发电机组电气控制理论，深入研究风电设备性能提升技术，对于优化电气设备管理模式、降低设备故障率、提高发电效率具有至关重要的现实意义。本文紧密结合新能

源行业设备管理的实际情况，从电气控制优化、状态监测与故障诊断、设备协同运行等多个角度，系统探索风电设备性能提升的具体路径和实施方法，并通过实际案例验证技术的有效性，为风力发电行业的技术进步和可持续发展提供坚实的技术支撑。

一、风电设备电气系统性能现状与问题

(一) 电气设备性能衰减显著

风电设备长期暴露在野外复杂环境中，时刻承受着温度剧烈变化、高湿度、强风沙侵蚀以及持续振动等多种不利因素的综合作用，这使得电气设备的性能极易出现显著衰减。以变流器为例，作为连接发电机与电网的关键电气设备，其内部的功率模块在高频开关操作过程中会产生大量热量，而野外恶劣的环境进一步加剧了散热的难度。在长期运行中，功率模块的绝缘材料逐渐老化，散热性能不断下降，直接导致变流器的转换效率降低。某风电场的实际运行数据显示，运行 5 年以上的变流器，其平均转换效率较全新设备下降

3%~5%，按照该风电场单台机组额定功率 2.5MW、年有效发电小时数 2000 小时计算，单台机组每年因变流器效率下降造成的发电量损失可达 3.75 万 - 6.25 万 kWh，直接影响了风电场的发电收益。

发电机作为风力发电机组实现能量转换的核心部件，其定子、转子绕组在长期的高速旋转和电磁力作用下，绝缘层容易出现磨损、老化现象，同时可能因局部散热不良导致过热，进而引起输出功率的波动。

（二）电气控制系统响应滞后

风力发电机组的电气控制系统需要根据实时变化的风速、风向等气象参数，以及电网的运行状态，动态调整机组的运行状态，以实现风能的最大捕获和稳定并网。然而，在部分风电场的实际运行中，电气控制系统存在较为明显的响应滞后问题。具体表现为：当风速出现突变时，变桨距系统未能及时调整叶片角度，偏航系统也不能迅速对准风向，导致机组在短时间内无法捕获最佳风能，造成能量损失；当电网出现电压波动时，励磁控制系统的调节存在延迟，使得发电机输出的并网电流谐波含量超标，不仅影响机组自身的稳定运行，还对电网的电能质量和稳定性造成不利影响。

控制系统响应滞后的根源主要在于控制算法的陈旧和僵化，未能充分结合实时的气象数据与设备运行状态进行自适应调整。例如，传统的 PID 控制算法在风速呈非线性变化时，参数整定难度较大，难以实现精准控制，容易出现超调或震荡现象，大大降低了功率控制的精度。在风速快速变化的情况下，采用传统 PID 算法的控制系统，其功率调节的响应时间可能超过 1 秒，而先进的控制算法响应时间可控制在 0.3 秒以内，两者在风能捕获效率上的差异可达 3%~5%。

（三）设备状态监测与故障诊断能力不足

当前，多数风电场的电气设备管理模式仍较为传统，主要依赖定期巡检和人工检查，缺乏完善的实时在线监测手段。对于变流器的 IGBT 模块温度、直流母线电压波动、发电机绝缘电阻变化、控制系统通讯状态等关键参数，未能实现连续、实时的监测，导致许多潜在的故障隐患难以被早期发现和及时处理。某风电场曾发生一起因发电机轴承绝缘老化未被及时检测，最终引发轴承短路故障的案例，造成该台风机停机维修 72 小时，不仅直接损失发电量约 1.8 万 kWh（按单机容量 2.5MW 计算），还产生了高达 15 万元的维修费用，直接经济损失超过 10 万元。

在故障诊断方面，现有系统大多采用简单的阈值判断法，即当监测参数超过预设的阈值时才发出报警信号。这种方法对早期微弱的故障信号识别能力非常有限，难以满足设备状态预警的需求。例如，变流器中的电解电容在老化初期，仅表现为容值的微小变化和等效串联电阻（ESR）的轻微增大，传统的监测方法难以准确识别这些细微变化，往往直至电容出现明显的鼓包、漏液甚至爆炸等严重故障时才被发现，此时设备已接近报废状态，不仅维修成本高昂，还可能造成严重的安全事故。据统计，采用传统故障诊断方法的风电场，设备早期故障的检出率不足 30%，远远不能满足设

备安全稳定运行的要求。

二、基于电气控制理论的性能提升技术

（一）电气控制系统优化技术

1. 自适应控制算法应用

基于模型预测控制（MPC）理论，构建风力发电机组电气控制系统的动态模型，实现对风速、功率、电压、电流等多参数的实时优化控制。MPC 算法通过滚动优化与反馈校正机制，能够根据当前的风速预测数据、设备运行状态参数，以及电网的调度指令，动态调整变桨角的变化速率与励磁电流的大小，使机组在宽风速范围内始终保持最大功率输出。某风电场在应用该算法后，通过对比测试发现，在低风速段（3~8m/s），发电效率提升了 4.2%；在高风速段（12~18m/s），功率波动幅度从原来的 $\pm 5\%$ 降低至 $\pm 2\%$ 以内，大大提高了机组运行的稳定性和能量捕获效率。

同时，结合模糊控制理论，对 MPC 算法进行优化，使其能够更好地处理风速变化中的不确定性因素。模糊控制通过建立模糊规则库，将专家经验转化为控制策略，弥补了传统控制算法对非线性、时变系统控制精度不足的缺陷。

（二）电气设备状态监测与故障诊断技术

1. 多传感融合监测系统

在电气设备的关键部位科学部署多种类型的传感器，构建全方位、多层次的状态监测网络。具体而言，在变流器 IGBT 模块表面安装光纤光栅传感器，利用其对温度变化的高敏感性，实时监测模块的温度变化，监测精度可达 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ ，能够及时发现模块的过热隐患；在发电机轴承座安装高精度的加速度传感器，采集轴承运行过程中的振动信号，振动信号的频率范围覆盖 0~10kHz，可有效捕捉轴承早期磨损产生的微弱振动；在发电机定子绕组上布置绝缘传感器，实时监测绕组的绝缘电阻和局部放电量，提前预警绝缘老化问题。

通过工业以太网将各个传感器采集到的数据实时传输至云端监测平台，平台采用数据可视化技术，将设备的运行状态参数以图表、曲线等形式直观展示给运行管理人员，实现状态参数的实时可视化监控。同时，平台还具备数据存储功能，可保存设备长达 5 年以上的历史运行数据，为设备的性能分析和寿命评估提供数据支持。某风电场应用该多传感融合监测系统后，设备状态参数的监测覆盖率从原来的 30% 提升至 90% 以上，为设备的安全运行提供了有力保障。

2. 基于大数据的故障诊断模型

利用机器学习算法对风电场积累的大量历史故障数据与实时监测数据进行深度挖掘和训练，构建高精度的故障诊断模型。例如，针对变流器电容老化问题，采用随机森林算法对电容的等效串联电阻（ESR）、容值、温度等特征参数进行分析，通过训练后的模型能够准确识别电容的老化程度，可在故障发生前 3~6 个月发出预警。该模型的故障识别准确率可达 90% 以上，大大提高了设备故障的早期发现

能力。

某风电场应用该故障诊断模型后,通过对比应用前后的设备运行数据发现,电气设备的故障检出率提升了 60%,平均维修时间缩短了 40%。以变流器电容故障为例,应用模型前,平均每台变流器因电容故障导致的停机维修时间为 48 小时,应用模型后,通过早期预警和提前维护,停机维修时间缩短至 28.8 小时,显著提高了设备的可用率。

(三) 电气设备协同运行优化技术

1. 设备参数匹配性优化

基于电气系统阻抗匹配理论,结合风电场的实际运行环境和负荷特性,重新设计和优化发电机与变流器的关键参数。具体而言,根据风电场的风速分布特性,通过统计分析近 5 年的风速数据,确定风速的概率分布和平均风速,以此为依据选择额定转速与风速范围相匹配的发电机,使变流器能够工作在高效区间(负载率 70%~90%)。

某风电场通过参数匹配性优化,将发电机额定功率与变流器容量的匹配比从原来的 1:1.2 调整为 1:1.05,在保证设备安全运行的前提下,变流器的运行效率提升了 2.3%。按该风电场总装机容量 100MW 计算,每年可增加发电量约 50 万 kWh,经济效益显著。

2. 能量管理系统(EMS)集成

开发专门适用于风电场景的能量管理系统(EMS),实现电气设备的协同控制和能量的优化分配。EMS 通过与风电场的气象预测系统、电网调度系统进行数据交互,获取实时的风速预测数据和电网负荷需求信息,然后根据这些信息动态分配各台机组的输出功率。在分配过程中,EMS 能够协调变流器的调制策略与变压器的分接头调节,使整个风电场的无功损耗降至最低。

三、技术应用效果与实践验证

某新能源企业在旗下一座装机容量为 200MW 的风电场全面应用了上述性能提升技术,经过为期 1 年的实际运行验证,取得了显著的应用效果:

在设备可靠性方面,电气设备的平均无故障运行时间从原来的 5000 小时延长至 7500 小时,延长了 50%,设备的故障率下降了 40%。其中,变流器的故障次数从每年 2.5 次/台降至 1.5 次/台,发电机的故障次数从每年 1.8 次/台降至 1.1 次/台,大大减少了设备的停机维修时间。

参考文献

- [1]贺益康,周鹏。风力发电变流器设计与控制[M].北京:机械工业出版社,2020.
- [2]杨耕,罗应立。电机学(第5版)[M].北京:清华大学出版社,2019.
- [3]张化光,杨俊友。新能源发电系统的智能控制技术[M].北京:科学出版社,2018.
- [4]李建林,惠东。风力发电系统变流器技术[M].北京:中国电力出版社,2017.
- [5]陈伯时,陈敏逊。电力拖动自动控制系统(第5版)[M].北京:机械工业出版社,2019.

在发电效率方面,全场的平均发电效率提升了 5.8%。按照该风电场年平均利用小时数 2200 小时计算,年增发电量为 $200\text{MW} \times 2200\text{h} \times 5.8\% = 25.52$ 万 kWh,按照上网电价 0.6 元/kWh 计算,新增收益约 153.12 万元。同时,在低风速段和高风速段的发电效率提升更为明显,分别达到了 4.5% 和 6.2%。

在运营成本方面,电气设备的维护成本降低了 30%,年均节省维修费用 80 万元。这主要得益于故障诊断技术的应用,使设备的故障能够早期发现和及时处理,避免了故障扩大导致的高额维修费用,同时,差异化维护计划的实施也减少了不必要的维护开支。

在电能质量方面,并网电能质量指标得到显著改善,电流谐波畸变率从原来的 5% 降至 2% 以下,完全满足 GB/T 19963-2011《风电场接入电力系统技术规定》的要求,提高了风电场与电网的兼容性。

实践表明,基于电气控制理论的性能提升技术,能够有效解决风电设备电气系统的性能问题,为新能源行业设备管理提供了可行路径,具有广泛的推广应用价值。

四、结论

风电设备性能提升是新能源行业高质量发展的关键课题,基于电气控制理论的技术创新是实现这一目标的核心路径。通过优化电气控制系统,采用自适应控制算法、改进变流器拓扑结构、进行励磁系统数字化改造等措施,能够显著提高设备的控制精度和响应速度;构建智能监测与诊断体系,应用多传感融合监测系统和基于大数据的故障诊断模型,可实现设备状态的实时监控和故障的早期预警;实现设备协同运行,通过优化设备参数匹配性、集成能量管理系统、开展设备健康度评估与寿命预测等手段,能够提升整个风电场的运行效率和可靠性。

未来研究应进一步聚焦于极端工况下的电气设备性能保障技术,如台风、低温、高海拔等特殊环境下的控制策略优化,以提高风电设备对复杂环境的适应能力;同时,加强数字孪生技术在设备全生命周期管理中的应用研究,通过构建虚拟的设备数字模型,实现设备运行状态的实时模拟和预测,为设备的性能优化和维护决策提供更精准的支持,进一步推动风电设备性能向更高水平发展,为全球能源转型做出更大贡献。