

风力发电电气控制技术研究

王志军

辽宁龙源新能源发展有限公司 辽宁 沈阳 110000

摘要: 在全球能源结构加速向清洁化转型的背景下, 风力发电凭借其绿色、可持续的优势, 已成为新能源领域的重要支柱。本文聚焦于风力发电电气控制技术展开深入研究。首先对风力发电电气控制技术进行概述, 阐述其基本概念和重要性。关键技术方面, 最大功率点跟踪技术可实现风能的高效捕获, 变桨距控制技术能调节桨叶角度以适应不同工况, 偏航控制技术可调整风机方向对准来风, 低电压穿越控制技术确保电网故障时风机稳定运行, 储能系统协调控制技术提升系统稳定性和可靠性。发展趋势上, 智能化控制技术、新型电气设备与材料应用、多能互补与储能技术融合成为未来方向, 对风力发电行业发展具有重要指导意义。

关键词: 风力发电; 电气控制; 技术研究

引言: 随着全球对清洁能源需求的不断增长, 风力发电作为一种重要的可再生能源发电方式, 受到广泛关注。风力发电技术的核心之一是电气控制技术, 它直接影响着风力发电系统的效率、稳定性和可靠性。一方面, 有效的电气控制技术能提高风能的转换效率, 使风机在不同工况下都能实现最大功率输出; 另一方面, 还能保障风机在电网故障等复杂情况下的稳定运行。本文将对风力发电电气控制技术的关键技术和发展趋势进行详细探讨, 以推动风力发电行业的进一步发展。

1 风力发电电气控制技术的概述

风力发电电气控制技术是保障风力发电系统高效、稳定运行的关键, 贯穿于风能捕获、能量转换到电能输送的全流程。(1) 从能量转换角度来看, 风力发电电气控制技术负责将风机叶片捕获的风能, 通过发电机转化为电能, 并实现对电能质量的调控。在这一过程中, 控制系统需实时监测风速、风向等环境参数, 以及发电机转速、输出电压、电流等电气参数, 根据预设的控制策略调整系统运行状态, 确保风能转化效率最大化。例如, 当风速变化时, 通过控制策略及时调整发电机励磁电流, 维持输出电压稳定。(2) 在系统稳定运行方面, 风力发电电气控制技术起着至关重要的作用。风电场通常处于复杂多变的环境中, 电网工况也时有波动。电气控制技术能够协调风机各部件之间的运行, 保障风机在不同工况下的安全稳定。比如, 当电网电压出现波动时, 低电压穿越控制技术可使风机保持运行而不脱网, 避免对电网造成更大冲击。(3) 从能源管理角度出发, 风力发电电气控制技术实现了对风电场整体的优化管理。它不仅能控制单台风机的运行, 还可对整个风电场的风机进行集群控制, 通过合理分配发电功率, 减少风

机间的相互干扰, 提升风电场的整体发电效率和经济效益。同时, 结合储能系统, 电气控制技术能够有效平滑风电输出, 提高风电在能源结构中的占比, 推动能源结构向绿色低碳转型^[1]。

2 风力发电电气控制关键的技术

2.1 最大功率点跟踪技术

在风力发电系统中, 风能的间歇性与随机性决定了最大功率点跟踪(MPPT)技术的核心地位。该技术基于贝兹理论, 通过实时监测风速、发电机转速、输出功率等参数, 运用智能算法动态调节风力发电机运行状态, 使其始终保持在最大功率输出点。常见的控制算法中, 爬山法通过周期性改变发电机转矩, 观察功率变化趋势并向功率增加方向调整; 模糊控制法则利用模糊逻辑规则, 将风速、转速等变量映射为最优控制参数, 避免传统算法在复杂工况下的振荡问题。随着电力电子技术与人工智能的融合, MPPT技术正朝着自适应、多目标优化方向发展。例如, 采用神经网络算法的MPPT系统, 可通过历史数据训练模型, 快速适应多变的风速环境; 结合模型预测控制(MPC)的方法, 能够提前预判风速变化, 实现更精准的功率调节。在实际应用中, 内蒙古某大型风电场引入改进型MPPT技术后, 年发电量提升约10%, 有效降低了度电成本。此外, 该技术在小型离网风力发电系统中同样发挥重要作用, 保障偏远地区电力供应的稳定性与经济性。

2.2 变桨距控制技术

变桨距控制技术通过调节风力机叶片的桨距角, 实现对风能捕获效率与发电功率的精准调控。其工作原理是: 在低风速阶段, 桨距角维持较小角度, 使叶片以最佳攻角吸收风能, 提升启动性能; 当风速超过额定值

时,系统迅速增大桨距角,减少叶片迎风面积,避免机械过载与功率波动。现代变桨系统多采用电动或液压驱动,结合高精度传感器与PID控制算法,可实现亚秒级响应速度。例如,海上风电机组常配备独立变桨技术,通过对三片叶片的差异化控制,降低非对称载荷对主轴的疲劳损伤。在技术演进方面,变桨距控制正与智能运维深度结合。基于物联网的实时监测系统,可通过应变片、振动传感器采集叶片受力数据,动态优化桨距调节策略;引入机器学习算法后,系统能够预测叶片疲劳寿命,提前预警潜在故障。德国某海上风电场应用智能变桨技术后,机组年均故障率下降15%,维护成本显著降低。此外,变桨距控制还可辅助电网调频,通过快速调节桨距角改变有功功率输出,提升电力系统稳定性。

2.3 偏航控制技术

偏航控制技术旨在确保风力发电机风轮始终正对风向,最大化风能捕获效率。该系统由风向传感器、控制器与偏航驱动机构组成,当风向偏差超过设定阈值(通常为 5° - 10°)时,控制器驱动电机或液压装置,带动机舱旋转至最佳方位。为减少频繁调向导致的机械磨损,现代偏航系统采用滞环控制策略,仅在风向持续偏离时触发动作,并通过齿轮箱的精密设计降低转动惯量。在复杂环境下,偏航控制技术展现出独特优势。例如,在湍流强度高的山地风电场,引入激光雷达测风技术的偏航系统,可提前3-5秒预测风向变化,实现主动偏航;海上风电场则通过多传感器融合(风向、风速、机舱振动),提升偏航控制的鲁棒性。丹麦某风电场应用智能偏航系统后,年均发电量提升8%,同时降低了主轴与齿轮箱的维护频率。此外,偏航控制与变桨距控制的协同优化,能够进一步减少气动噪声与结构载荷,推动风力发电向绿色、高效方向发展。

2.4 低电压穿越控制技术

随着风电渗透率的提升,低电压穿越(LVRT)技术成为保障电网稳定运行的关键。当电网发生短路故障导致电压骤降时,LVRT技术要求风机在规定时间内(如电压跌落至20%额定值时持续运行625ms)不脱网,并向电网注入无功功率辅助电压恢复。实现该功能的核心在于电力电子变流器的快速控制,通过调节网侧变流器的无功电流指令,补偿系统无功缺额;同时,直流侧卸荷电路可消耗过剩能量,防止直流母线过压。近年来,LVRT技术不断突破创新。基于虚拟同步机(VSG)控制的方法,使风机具备类似同步发电机的惯性响应能力;采用碳化硅器件的变流器,可将响应速度提升至微秒级。在实际工程中,我国甘肃酒泉风电基地部署的LVRT系统,

成功应对多次电网故障,避免大规模脱网事故。此外,LVRT技术的应用还推动了风电并网标准的完善,欧盟、北美等地区均对风机低电压穿越能力提出严格要求,促进了行业技术升级。

2.5 储能系统协调控制技术

储能系统协调控制技术致力于解决风电出力的波动性与间歇性问题,通过优化储能装置(如锂电池、液流电池)的充放电策略,实现“削峰填谷”与电力平滑。其控制策略需综合考虑风电预测误差、电网调度指令、储能荷电状态(SOC)等因素,采用模型预测控制(MPC)、分层优化等算法制定最优方案。例如,在风电大发时段,储能系统优先充电;电网尖峰负荷时,储能与风电协同放电,减少对传统电源的依赖。在新型储能技术应用方面,飞轮储能与超级电容的快速响应特性,使其成为风电调频的理想选择;而相变储能与压缩空气储能则适用于能量时移。美国德克萨斯州某风储一体化项目中,通过锂电池储能系统与风机的协同控制,将风电功率波动率从30%降至5%,显著提升并网质量。此外,储能系统协调控制还可参与电力市场交易,通过峰谷电价套利与辅助服务获取收益,为风电项目创造多元盈利模式,加速能源转型进程^[2]。

3 风力发电电气控制技术的发展趋势

3.1 智能化控制技术发展趋势

在数字化与人工智能技术蓬勃发展的背景下,风力发电电气控制技术正加速向智能化方向演进。第一,大数据与机器学习算法的深度学习,显著提升了风力发电系统的预测与决策能力。通过收集海量的风速、风向、设备运行状态等数据,构建深度学习模型,能够精准预测风功率输出,提前调整风机运行参数,降低因风能波动带来的不确定性。例如,采用长短期记忆网络(LSTM)的预测系统,可将风功率预测误差降低至5%以内,为电网调度提供可靠依据。第二,智能运维技术成为发展热点。基于物联网的传感器网络实时采集风机各部件的振动、温度、应力等数据,结合故障诊断算法,能够实现设备故障的早期预警与精准定位。无人机巡检与机器人维护技术的应用,进一步提升了运维效率与安全性。德国某风电场部署的智能运维系统,通过分析历史故障数据,将风机年均停机时间缩短了20%。第三,智能化控制技术推动了风电场群协同控制的发展。通过云端平台整合区域内多座风电场的的数据,利用分布式优化算法实现全局功率调控,提升风电集群的整体可控性与稳定性。未来,随着边缘计算与5G通信技术的普及,智能化控制将向更高效、更实时的方向发展,助力

构建智慧型风电系统。

3.2 新型电气设备与材料的应用

新型电气设备与材料的不断涌现,为风力发电电气控制技术带来了革命性突破。在电力电子器件领域,以碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)为代表的宽禁带半导体材料,凭借其高开关频率、低损耗、耐高温等特性,大幅提升了变流器的效率与功率密度。采用SiC器件的风电变流器,转换效率可提高3%-5%,体积缩小30%,有效降低了设备成本与占地面积。在电气绝缘材料方面,新型纳米复合绝缘材料的应用显著增强了设备的绝缘性能与可靠性。通过在传统绝缘材料中添加纳米粒子,可提升材料的耐电晕、耐局部放电能力,延长设备使用寿命。同时,超导材料在风力发电机中的研究与应用也取得进展,高温超导线圈能够降低绕组损耗,提高发电机效率,目前已在小型超导风力发电机中实现示范应用。此外,新型传感器技术的发展为精确控制提供了支撑。光纤传感器具有抗电磁干扰、精度高、寿命长等优势,可用于监测风机主轴扭矩、叶片应变等关键参数;非接触式传感器则可实现对旋转部件的实时状态监测。

3.3 多能互补与储能技术融合

多能互补与储能技术融合已成为风力发电电气控制技术的重要发展方向。风力发电的间歇性与波动性,使其难以独立满足稳定供电需求,而通过与太阳能、水能、天然气发电等其他能源形式互补,能够平滑电力输出,提升能源供应稳定性。例如,风光储一体化项目通过光伏与风电的时空互补,结合储能系统的灵活调节,可将综合发电利用率提高15%-20%。在储能技术融合方面,多种储能方式协同应用成为趋势。锂电池具有能量密度高、响应速度快的特点,适用于快速功率调节;液流电池则以长寿命、大容量优势,承担长时间能量存储任务;压缩空气储能与飞轮储能能在大规模储能与快速调频领域发挥重要作用。通过优化控制策略,实现不同储能设备的优势互补,能够满足电力系统多样化的需求。此外,多能互补与储能融合还促进了微电网与虚拟电厂的发展。通过智能能量管理系统,整合区域内分布式电

源、储能设备与负荷,实现自主运行与优化调度。在电力市场环境下,虚拟电厂可通过聚合分散的风电、储能资源,参与调峰、调频等辅助服务交易,提升能源利用价值。

3.4 电网友好型交互与协同控制趋势

在风电装机规模持续扩张、新能源占比不断提升的背景下,风力发电电气控制技术正加速向电网友好型交互与协同控制方向发展。传统风电接入易引发电网稳定性问题,而新型控制技术通过赋予风机主动支撑能力,实现高/低电压穿越、频率调节及惯量响应等功能。如虚拟同步机(VSG)控制技术,能使风机模拟同步发电机动态特性,在电网频率波动时快速响应,增强系统稳定性。风电场与电网的协同控制机制也在不断完善。依托5G、物联网等先进通信技术与智能算法,风电场可实时接收电网调度指令,灵活调整发电功率,参与调峰、调压等辅助服务。德国E.ON公司海上风电场实践显示,通过实时交互,该风电场能在负荷峰谷阶段灵活调节出力,大幅提升风电消纳效率。此外,分布式风电与配电网的协同控制,通过优化并网方案与潮流控制,减少电压波动与线路损耗^[1]。

结束语

风力发电电气控制技术作为新能源发展的核心支撑,从最大功率点跟踪到电网友好型协同控制,每项技术的突破都推动着风电产业向高效、稳定、智能迈进。这些技术不仅解决了风能利用的间歇性与波动性难题,更在新型电力系统构建中发挥关键作用。随着智能化、新材料与多能融合趋势的深化,风力发电将更好地融入能源体系。

参考文献

- [1]李志刚.风力发电机控制系统及其控制策略研究[J].电力系统自动化,2021,36(12):121-126.
- [2]陈德亮.风力发电机组并网运行技术[J].电力系统自动化,2021,35(22):165-167
- [3]张俊峰.风力发电系统中的电力电子技术[J].电力系统自动化,2021,34(18):198-199