

风力发电电气控制系统研究

廖伟 肖静

四川能源发展集团甘肃电力有限公司 甘肃 兰州 730000

摘要: 随着全球能源结构向清洁能源转型, 风力发电重要性凸显, 其技术成熟度与经济性持续提升。电气控制系统作为风力发电系统的“神经中枢”, 对机组发电效率、运行安全及电网兼容性起决定作用。本文聚焦该系统, 阐述其组成与原理, 分析变流器、MPPT、变桨距控制等关键技术, 探讨MPC、智能算法等优化策略, 并结合分布式发电与微电网集成需求提出性能提升路径。多技术协同优化可增强风电系统稳定性与经济性, 支撑高比例风电并网。

关键词: 风力发电; 电气控制; 优化策略

引言: 在全球能源转型的大背景下, 清洁能源发展势不可挡, 风力发电凭借其技术成熟度与经济性优势, 成为能源领域的关键力量。电气控制系统作为风力发电系统的核心, 对机组发电效率、运行安全以及电网兼容性起着决定性作用。然而, 风力发电面临风速多变、电网接入要求高等诸多挑战, 深入探究其电气控制系统的关键技术与优化策略, 对提升风电系统性能、推动高比例风电并网具有重要意义。

1 风力发电系统概述

1.1 风力发电系统组成

风力发电系统由机械与电气部分构成。机械部分含风轮(叶片、轮毂)、传动(主轴、齿轮箱)、偏航及制动系统, 负责捕获并传递风能。电气部分有发电机、变流器等, 承担能量转换与控制。电气控制系统是核心, 由传感器、控制器、执行器及通信模块组成, 实现机组智能化运行。远程监控系统(SCADA)与现场控制器通信, 完成风电场集中管理与调度, 形成“单机控制-场级协调”双层架构。

1.2 风力发电工作原理

风力发电系统的核心是将风能转化为电能。当风轮受到风力作用旋转时, 通过传动系统将机械能传递至发电机, 驱动发电机转子旋转切割磁感线产生电能。根据发电机类型不同, 能量转换路径存在差异: 双馈异步发电机(DFIG)通过转子侧变流器调节转子电流, 实现变速恒频发电; 永磁同步发电机(PMSG)则通过全功率变流器将发出的变频交流电转换为与电网同频同相的电能。电气控制系统通过监测风速、转速等参数, 动态调整变桨角度与励磁电流, 在低风速时最大化捕获风能(追踪最大功率点), 高风速时限制输出功率以保护设备, 最终通过并网装置将电能平稳接入电网。

1.3 电气控制系统功能需求

电气控制系统功能需求多样。高效发电上, 通过MPPT控制与变桨距调节, 在0-25m/s风速实现风能利用系数最大化; 安全保护方面, 能检测过转速等故障, 极端风速或电网故障时紧急停机; 电网兼容性上, 满足低、高电压穿越标准, 维持并网且有无功调节能力; 智能化管理上, 借助数据采集与远程通信, 实现状态监测、故障预警及远程运维, 提升运营效率^[1]。

2 风力发电电气控制系统关键技术

2.1 变流器技术

变流器是风力发电系统能量转换的核心设备, 负责实现电能的频率、电压调节与并网控制。双馈风电系统采用背靠背变流器拓扑, 由转子侧变流器(RSC)与网侧变流器(GSC)组成, RSC控制发电机转速与无功功率, GSC维持直流母线电压稳定并控制并网电流; 全功率变流器则适用于永磁同步机组, 采用两电平或三电平拓扑, 通过IGBT等功率器件的高频开关动作, 将发电机输出的变频电转换为工频电。近年来, 基于碳化硅(SiC)器件的变流器因开关损耗低、耐高温性能优异, 逐渐应用于大功率机组, 可使转换效率提升至98.5%以上, 同时降低冷却系统能耗, 适应海上风电等恶劣环境。

2.2 最大功率点跟踪(MPPT)控制

MPPT控制的目标是在风速变化时实时调整机组运行状态, 使风能利用系数保持最优。传统算法如扰动观察法通过周期性改变转速并检测功率变化方向追踪最大功率点, 虽实现简单但存在震荡损耗; 爬山法基于风速-功率曲线特性, 通过比较相邻时刻功率值调整转速, 适用于风速平稳场景。改进算法中, 模糊PID控制结合风速预测与功率反馈, 减少动态风速下的跟踪延迟; 粒子群优化(PSO)算法通过群体智能搜索全局最优解, 提升复杂湍流风况下的跟踪精度。实际应用中, 需根据风电场气候特征选择算法, 例如海上风电场常采用带风速前馈的

复合控制策略，以应对阵风频繁的工况。

2.3 变桨距控制技术

变桨距控制通过调节叶片角度改变风轮捕获风能的能力，是高速段功率稳定与机组安全的关键。系统由变桨电机、减速齿轮、角度传感器及控制器组成，采用分层控制逻辑：正常运行时，根据风速与功率偏差通过PID算法输出变桨指令，使功率稳定在额定值；极端工况下，触发快速顺桨（叶片旋转至 90° ），通过气动制动降低转速。为提升响应速度，现代变桨系统多采用电动变桨方案，单叶片独立控制，可补偿风剪切与塔影效应导致的载荷波动^[2]。此外，变桨冗余设计（双电机、双传感器）确保单点故障时仍能安全停机，满足GL等国际认证标准。

2.4 低电压穿越（LVRT）技术

LVRT技术保障电网故障时风电系统不脱网，是电网对风电场的强制性要求。当电网电压跌落至额定值的20%-90%时，控制系统需通过变流器调制策略维持直流母线电压稳定：双馈机组通过RSC向转子注入无功电流，支撑定子电压；全功率机组则通过网侧变流器吸收或发出无功，参与电网电压恢复。同时，配合crowbar电路（撬棒电路）在电压深度跌落时旁路转子电流，避免变流器过流损坏。近年来，基于模型预测的LVRT控制可根据电压跌落深度动态调整控制参数，在满足穿越时间要求（如电压跌落至20%时持续150ms）的同时，减少有功功率波动对电网的冲击。

2.5 故障诊断与容错控制

故障诊断与容错控制是提升机组可靠性的核心技术。系统通过传感器实时采集振动、温度、电流等信号，采用数据驱动方法（如BP神经网络、支持向量机）识别故障类型：振动信号异常可诊断轴承磨损，温度超限提示变流器IGBT老化，电流畸变反映发电机绕组故障。容错控制通过硬件冗余（如双控制器、备用传感器）与软件重构实现故障隔离，例如变桨电机单路故障时，切换至备用驱动回路并调整控制律，确保叶片角度仍可调节。结合数字孪生技术，可构建机组虚拟模型，通过虚实数据比对提前预警潜在故障，将平均故障修复时间（MTTR）缩短30%以上。

3 风力发电电气控制系统优化策略

3.1 基于模型预测控制（MPC）的优化

基于模型预测控制（MPC）的优化策略是提升风力发电电气控制系统动态性能的重要方向，其核心原理是通过建立系统未来一段时间内的预测模型，结合约束条件（如功率上限、转速限制）与优化目标（如最大功

率捕获、最小谐波畸变），求解最优控制序列，实现对变流器、变桨系统的精准控制。与传统PID控制相比，MPC具备多变量协同控制与约束处理能力，可同时优化功率输出、电流谐波与设备损耗，适用于风力发电系统多变量、强耦合、非线性的特性。在MPPT控制优化中，MPC通过建立风速-转速-功率的非线性预测模型，结合未来3-5个采样周期的风速预测数据，提前调整发电机转速，避免传统算法在风速波动时的滞后性，在阵风条件下最大功率捕获效率提升5%-10%；在变桨距控制优化中，MPC将叶片机械应力、变桨电机扭矩等约束条件纳入优化目标，在调节功率的同时减少叶片疲劳损伤，延长叶片使用寿命约10%；在变流器控制优化中，MPC通过预测直流侧电压与电网电流变化，优化SVPWM开关时序，使并网电流谐波畸变率（THD）控制在3%以内，低于传统控制策略的5%，同时降低IGBT开关损耗约15%。MPC在风力发电中的应用难点在于模型精度与计算复杂度：需通过现场试验不断修正预测模型，适应不同工况与设备老化特性；采用多核处理器与简化算法（如显式MPC），将控制周期缩短至50 μ s以内，满足实时控制要求^[3]。目前，MPC已在1.5MW以上大型风电机组中逐步应用，实际运行数据显示，采用MPC的机组年发电量提升3%-5%，设备故障率降低10%-15%。

3.2 智能控制算法应用

智能控制算法的应用是解决风力发电系统非线性、不确定性问题的关键优化策略，通过模拟人类智能决策过程，实现对复杂工况的自适应控制，主要包括模糊控制、神经网络控制、粒子群优化与强化学习等算法。模糊控制算法基于模糊数学理论，将专家经验转化为模糊规则，无需建立精确数学模型，适用于变桨距控制与故障诊断：在变桨距控制中，根据风速偏差与功率偏差的模糊隶属度，动态调整变桨速度，避免传统PID控制在高速时的超调现象，功率稳定时间缩短至0.5s以内；在故障诊断中，通过建立“温度-振动-电流”的模糊推理规则，实现变流器IGBT故障的早期预警，预警准确率可达92%以上。神经网络控制算法具备强大的非线性拟合能力，通过训练样本学习系统特性，适用于MPPT控制与电网适应性调节：在MPPT控制中，利用BP神经网络建立风速-转速-功率的映射关系，实时输出最优转速指令，在风速剧烈波动时功率捕获效率提升8%-12%；在电网电压跌落时，通过RBF神经网络预测电压恢复趋势，优化变流器无功功率输出，加速电网电压恢复。粒子群优化与强化学习算法属于优化算法，可用于控制参数寻优：粒子群优化算法通过模拟鸟群觅食行为，优化PID控制器的比

例、积分、微分参数,使变桨系统响应速度提升20%;强化学习算法通过“试错”机制学习最优控制策略,在微电网并网场景中,通过与电网交互学习,优化有功/无功功率分配,提升微电网稳定性。目前,智能控制算法多采用“复合算法”形式,如“模糊控制+神经网络”“粒子群优化+PID”,兼顾控制精度与实时性,在新型风电机组中的应用比例已超过40%,显著提升了系统的自适应能力与鲁棒性。

3.3 多电平变流器技术

多电平变流器技术是提升风力发电系统电能质量与功率等级的关键优化策略。它通过串联多个功率单元,实现输出电压多阶梯调节,减少电压谐波与开关损耗,适用于2MW以上大型风电机组及高压并网场景。与传统两电平变流器相比,多电平变流器优势明显,输出电压谐波低、开关器件电压应力小、无需大型滤波装置。主流拓扑结构有三种:二极管钳位型(NPC)结构简单、成本低,3-5电平设计在3MW风电机组广泛应用,输出电压THD可控制在2%以内;飞跨电容型(FC)功率密度高,但电容电压平衡控制复杂,适用于1-2MW中等功率等级;模块化多电平(MMC)电平数可灵活扩展(20-50电平),输出电压接近正弦波,谐波含量极低,还有冗余容错能力,已在 $\pm 320\text{kV}$ 海上风电柔直并网项目应用,传输效率超96%。其关键技术难点在于子模块电压平衡控制与拓扑结构优化,通过载波移相PWM(CPS-PWM)技术实现电压均衡,采用混合拓扑结构平衡成本与性能。随着风电机组功率等级提升,多电平变流器应用比例将增加,预计2030年在大型风电机组应用占比超70%,成为主流^[4]。

3.4 分布式发电与微电网集成

分布式发电与微电网集成是拓展风力发电应用场景、提升能源利用效率的重要策略。它将风电机组与光伏、储能、负荷组成微电网,实现风能就地消纳与灵活并网,减少对大电网依赖,适用于偏远地区、海岛与工

业园区等。在分布式风力发电系统中,电气控制系统优化重点有三:功率协调控制建立联合控制模型,根据负荷需求与可再生能源出力优化功率分配,确保供电稳定;储能协同调度采用“削峰填谷”策略,平抑功率波动,储能容量配置为风电额定功率的20%-30%,可使波动幅度控制在 $\pm 5\%$ 以内;微电网稳定控制改进变流器控制策略,实现“并网/离网”模式平滑切换,切换时间控制在100ms以内,避免负荷断电。另外,微电网集成需能量管理系统(EMS),实时采集数据优化运行策略,降低能源成本。目前,分布式风电微电网已在我国偏远地区推广应用,供电可靠性达99.8%以上,风能就地消纳率提升至85%,为可再生能源分布式利用提供可行路径。

结束语

风力发电电气控制系统是连接风能捕获与电网消纳的关键环节,其性能直接影响风电的经济性与可靠性。本文从系统组成、关键技术到优化策略,系统梳理了电气控制领域的研究进展。实验表明,基于MPC、智能算法及多电平变流器的优化方案可显著提升系统适应能力,而分布式发电与微电网集成则为风电大规模应用提供了新路径。未来,随着数字化(如数字孪生)与新材料(如高温超导)技术的发展,风力发电电气控制系统将向更高效率、更强鲁棒性方向演进,为全球能源转型注入持久动力。

参考文献

- [1] 嵇恒.风力发电机组电气与控制系统快速检修思路研究[J].消费电子,2022(8):38-40.
- [2] 王垒.电气控制技术在风力发电系统控制中的应用研究[J].电脑爱好者(普及版)(电子刊),2022(1):588-590.
- [3] 王志群,朱守真,范松江.风力发电系统智能控制技术研究[J].电力系统自动化,2022,46(24):1-18.
- [4] 杨继光.风力发电机组电气控制系统检修分析[J].设备管理与维修,2022,(15):61-62.