

新形势下新能源风力发电中的控制技术

苏川川¹ 王云端² 范 冉¹ 王海洋¹

1. 山东国华时代投资发展有限公司 山东 济南 250000

2. 中建八局第一建设有限公司 山东 济南 250000

摘 要: 新型电力系统建设背景下, 风电需从被动发电向主动电网支撑转型。本文梳理双馈、直驱永磁风机核心架构与MPPT、变桨等基础控制技术, 分析当前风电控制存在算法适配性差、并网支撑能力不足、极端工况可靠性弱等问题。结合人工智能、数字孪生等技术, 提出算法优化、并网升级、风储协同等优化策略, 剖析风电智能化、多能协同及海上高端控制的未来发展趋势, 为风电高效稳定运行提供技术参考。

关键词: 新形势; 新能源风力发电; 控制技术

引言: 双碳目标推动我国风电产业规模化、高质量发展, 高渗透率风电并网使电力系统惯量不足、电压频率波动等问题凸显, 对风电控制技术提出全新要求。传统风电控制模式难以适配复杂陆海风况与新型电网运行需求, 无法满足主动支撑电网、高效消纳风电、极端工况稳定运行的核心诉求。为此, 本文立足新形势, 系统探究风电核心控制技术的应用现状、现存短板, 针对性提出优化方案并预判行业发展趋势。

1 新形势下新能源风力发电系统及核心控制技术基础

1.1 风力发电系统核心架构与运行原理

(1) 主流风电机组分为双馈感应风机(DFIG)与直驱永磁风机(PMSG)。DFIG采用齿轮箱增速传动, 转子绕组经背靠背变流器实现变速恒频, 成本较低且技术成熟, 适用于陆上中高风速区域; PMSG省去齿轮箱, 由永磁体励磁, 全功率变流器并网, 具有效率高、维护量小、电网适应性强的优势, 更适配海上及低风速复杂环境。(2) 风电能量转换流程为: 风能驱动叶轮转化为机械能, 经主轴传递(DFIG需经齿轮箱增速)至发电机, 发电机将机械能转化为电能, 再经变流器整流逆变后升压并网。核心运行环节包括风速感知与功率预判、启停并网控制、MPPT追踪、变桨与偏航调节、转矩转速协调以及故障穿越保护, 各环节协同保障机组安全高效运行^[1]。(3) 高渗透率风电并网系统呈现转动惯量降低、频率与电压支撑能力弱化、宽频振荡风险增加等运行特征。新形势要求风电从“被动跟随”向“主动支撑”转型, 具备虚拟惯量响应、一次调频备用、故障穿越及弱电网适应能力, 成为电网友好型电源。

1.2 风电基础控制技术分类与原理

(1) MPPT控制依据风机气动特性, 在低于额定风速时, 通过调节发电机转矩或转速使叶尖速比保持最

优, 维持风能利用系数 C_p 最大, 实现最大功率捕获。常用方法包括叶尖速比法、功率信号反馈法及爬山搜索法。(2) 变桨距控制通过伺服机构调节桨叶攻角以改变气动转矩, 在额定风速以上限制功率输出并降低机械载荷; 偏航控制驱动机舱水平旋转对准主风向, 提升捕风效率, 减少偏航误差造成的能量损失与疲劳载荷。(3) 转速与转矩稳态调节基于气动转矩与电磁转矩的平衡关系, 通过PI或滑模控制策略调节变流器电流, 使机组转速稳定于最优叶尖速比对应值, 同时实现功率平滑输出, 避免频繁穿越共振转速区。

1.3 新型电力系统下风电控制技术新要求

(1) 电网调频、调压辅助支撑的控制需求升级体现在风电需具备类似传统同步机组的惯量支撑与一次调频能力, 通过附加虚拟惯量控制和下垂控制快速响应频率变化; 同时利用无功调节能力支撑并网点电压, 要求响应时间毫秒级, 控制策略需兼顾有功无功协调。(2) 风电消纳与间歇性波动抑制的控制优化需求强调超短期风功率预测与储能协同优化, 结合机组出力平滑控制、限功率运行及多机协调调度策略, 降低爬坡率, 提升电网接纳风电能力, 减少弃风^[2]。(3) 海上风电复杂工况下的高可靠性控制需求涵盖台风工况的极端风速穿越控制、盐雾腐蚀下的传感器冗余容错设计、海浪引起的塔架振动抑制, 以及深远海柔性直流送出系统的故障穿越与黑启动能力, 对控制系统的鲁棒性、容错性和冗余度提出显著更高要求。

2 新形势下新能源风力发电核心控制技术应用与现存问题

2.1 风电稳态运行优化控制技术应用

(1) 自适应MPPT控制技术针对复杂风速环境的湍流强度高、风向多变等特征, 通过在线辨识风速变化趋

势与机组最优转速点,动态调整功率追踪系数,使风能利用系数在不同风速区间均保持较高水平。实际风电场应用表明,该技术在年均风速波动较大的场站可提升发电量3%~6%,同时减少转矩频繁突变对传动链的冲击。

(2)智能变桨距协调控制技术融合载荷预估与功率预测信息,在额定风速以上对桨距角进行多目标优化,不再单纯以功率平抑为唯一目标,而是兼顾塔顶位移、叶根弯矩等机械载荷指标。工程实践中,该技术可降低疲劳等效载荷约8%~12%,有效延长主轴轴承和齿轮箱的使用寿命,并抑制高风速段的功率超调现象。(3)风机偏航精准控制技术采用激光雷达或视觉测风辅助手段,提前获取机舱前方300~500米处风矢量信息,结合预测控制算法实现“预偏航”动作,减少风向突变时的对风滞后效应。现场实测数据显示,偏航误差可控制在 $\pm 1.5^\circ$ 以内,尾流影响下的年发电量损失减少约2%,同时大幅降低偏航电机频繁启停带来的机械磨损。

2.2 风电并网稳定控制技术应用

(1)低电压穿越与高电压穿越控制技术已在主流机型中实现标准化配置。电网故障瞬间,变流器快速切换至故障穿越控制模式,精准计算无功电流注入幅值与持续时间,确保机端电压快速恢复。实际电网短路故障记录验证,采用该技术的风电场可在电压跌至20%额定值情况下维持不脱网运行620ms以上,为电网故障恢复提供有效支撑。(2)并网功率因数与无功功率精准调控技术通过网侧变流器与无功补偿装置协同调节,依据并网点电压偏差实时计算无功需求,采用PI与模糊逻辑复合控制策略,实现无功功率毫秒级响应,并网点功率因数稳定在0.99(超前或滞后)范围内,显著提升风电场接入弱电网的适应能力^[3]。(3)风电场集群协同控制技术以场级控制器为核心,根据各机组运行状态和风况分布,动态分配有功/无功指令,并结合尾流效应优化场内机组出力组合。规模化应用后,集群出力波动率可降低约30%,多机组同时切出引发的并网电压骤变问题得到有效缓解。

2.3 当前风电控制技术应用现存核心问题

(1)复杂风况下传统PI或查表法控制算法难以适应风速的快速非平稳变化,MPPT动态追踪滞后明显,变桨动作频繁且幅度偏大,导致实际发电效率较理论值低5%~8%,且执行机构故障率居高不下。(2)高渗透率并网场景下,风电机组普遍采用跟网型控制,无法主动提供惯量支撑与一次调频备用容量。当系统发生大功率扰动时,风电场的调频调压响应速度和调节深度远不及同步机组,电网频率安全裕度持续收窄。(3)传统控制策略高度依赖精确数学模型和固定阈值判断,缺乏对机

组运行状态的自感知与自学习能力,异常工况的故障预判和预警手段欠缺,难以在故障演变早期实施干预,仍以“故障发生后被动停机保护”为主要应对方式。(4)海上风电在台风冲击、波浪诱导塔筒大幅晃动、盐雾腐蚀传感器等恶劣工况下,测量信号信噪比显著降低,通信链路时延抖动增大,控制器抗干扰裕度不足,变桨与转矩控制的精度明显下降,且缺乏冗余容错设计,极端工况下的控制可靠性难以保障。

3 新形势下新能源风力发电控制技术优化策略与发展趋势

3.1 风电运行控制算法优化策略

(1)基于人工智能的改进MPPT算法,采用深度强化学习框架构建风速-转速-功率三维动态映射模型,使控制器在时变湍流风况下具备在线策略更新能力。相较传统爬山法,该算法可将动态追踪响应时间缩短约40%,在风速陡降场景中功率捕获损失减少25%以上,显著提升变风速条件下的发电效能。(2)自适应变桨距与偏航协同控制策略,通过建立风-机-电耦合动态模型,将变桨与偏航动作纳入统一预测优化框架。控制器根据实时风速、风向变化率及机组载荷状态,动态决策动作优先级与执行幅值,避免变桨与偏航频繁联动引发的机械干涉与功率震荡,保障机组在多变工况下平稳高效运行^[4]。(3)机组载荷与发电效率协同优化方案,构建多目标非线性预测控制模型,以疲劳损伤累积与发电量加权组合为代价函数,在每一控制周期求解最优转矩-桨距协同指令序列。仿真验证表明,在牺牲不超过1.5%年发电量的前提下,关键结构部件等效疲劳载荷可降低12%~18%,实现发电收益与机组寿命的双赢。

3.2 风电并网控制技术升级方案

(1)电网故障穿越控制优化技术,采用正负序解耦与谐振前馈补偿相结合的控制架构,提升变流器在对称及不对称故障下的电流波形质量和直流母线电压稳定性。通过动态优化无功电流注入比例与有功功率恢复速率,使机组在电压深度跌落时仍可维持稳定并网运行,故障切除后功率回升时间压缩至80ms以内,大幅增强弱电网工况下的并网容错性能。(2)风电参与电网一次、二次调频智能控制策略,基于系统频率变化率、偏差量及变化趋势的多维特征,利用模糊神经网络动态调整虚拟惯量系数与下垂控制参数。该策略可根据电网扰动严重程度自动切换响应模式,在小扰动时保持经济运行,在大扰动时快速释放有功备用容量,实现频率支撑的精准适配与有限调节裕度的最优利用。(3)风储协同控制技术,采用模型预测控制与滚动时域优化框架,以并网

点功率波动率和储能荷电状态为联合约束,动态分配风电实时出力与储能充放电指令。该方案可在秒级至分钟级多时间尺度上实现功率平滑,同时维持储能工作区间在30%~90%荷电状态之间,延长储能循环寿命约20%,促进新能源高效消纳。

3.3 智能风电控制技术创新应用

(1) 大数据与机器学习在风电故障预警与精准控制中的应用,通过采集齿轮箱振动频谱、发电机温度场分布、变桨电机扭矩等数百维运行数据,构建基于梯度提升树与注意力机制时序网络的联合预警模型。该体系可在故障发生前30~120分钟发出分级预警,识别准确率超过92%,为运维决策争取充足响应窗口,推动风电运维从定期检修向预测性维护转型。(2) 数字孪生技术在风电场集群协同控制中的落地,基于高保真空气动力学与结构动力学模型,在虚拟空间中构建全场数字镜像,实时映射各机组运行状态。孪生平台内置多场景推演引擎,可在数秒内完成数千种控制方案的并行评估,筛选最优策略下发至实体机组,实现全场发电效率提升3%~5%,并均衡机组间疲劳载荷分布,延长场站整体服役周期^[5]。

(3) 物联网技术支撑下的风电远程智能调控与运维控制,依托5G低时延通信与边缘计算架构,建设云边协同调控体系。边缘控制器就地完成毫秒级闭环控制,云端平台负责全局策略优化与模型迭代,运维人员可通过远程操控终端实时监视与干预机组运行,支撑大规模风电场无人化或少人化值守模式的工程推广。

3.4 风电控制技术未来发展趋势

(1) 智能化、自适应控制算法将深度普及并持续迭代升级。以深度强化学习、迁移学习为代表的新一代智能算法将全面渗透至MPPT、变桨、偏航等核心控制环节,使每台风电机组具备基于自身运行历史与环境特征的独立自优化能力,实现控制策略的全生命周期自适应演进,逐步取代传统依赖人工整定的固定参数控制模式。(2) 风光储多能源协同控制与源网荷储一体化将成为新型电力系统建设的关键方向。未来风电场将从孤立

的场站控制单元拓展为“风光储联合发电系统”的核心组成部分,控制策略需统筹考虑光伏出力预测、储能调节裕度、负荷侧柔性响应及电网安全约束等多重因素,构建跨时间尺度、跨能源类型的协同优化调度体系,推动新能源发电向电网友好型、主动支撑型全面转型。

(3) 海上风电高端控制技术的研发将聚焦抗极端工况能力突破。面向15MW级以上超大型机组与深远海漂浮式平台,研发基于载荷状态感知的主动阻尼控制、机组-塔架-系泊系统耦合振动抑制技术,以及台风极端工况下的智能自保护与自恢复控制策略。结合卫星遥感与海洋气象大数据预报,实现极端环境来临前的预控决策与容错重构,从根本上提升深远海风电机组的极限生存能力与全生命周期发电可靠性。

结束语

综上,风电控制技术是保障风电机组高效发电、电网稳定运行的核心关键。当前风电控制仍存在算法滞后、并网支撑薄弱、极端工况容错性差等诸多短板。未来需深度融合人工智能、数字孪生、物联网等前沿技术,持续优化机组运行与并网控制策略,推进源网荷储协同发展,突破海上风电极端工况控制瓶颈,推动风电控制向智能化、自适应、高可靠方向升级,助力新型电力系统稳健构建。

参考文献

- [1]张华钦,王磊,陈宇.基于深度强化学习的风电场功率多变量综合优化控制[J].综合智慧能源,2025,47(01):71-78.
- [2]张伟,李建英,钟丁爱,等.基于MMC的多相风电系统双维改进VSG控制策略[J].湖南电力,2026,46(03):32-38.
- [3]邵冰冰,贾焦心.弱受端交流电网下风电并网柔性直流功率解耦控制技术[J].电工技术学报,2022,37(20):89-97.
- [4]王浩,杨峰.低惯量电网下双馈风电机组自适应调频控制策略[J].电力科学与工程,2025,41(11):45-51.
- [5]刘思远.新型电力系统下风电场智能协同控制技术研究[J].电力工程技术,2024,43(02):78-84.