

风力发电机原理及风力发电技术

董礼军

西北水利水电工程有限责任公司 陕西 西安 710100

摘要: 风力发电通过能量转换链将风能转为电能, 涉及变桨调节、偏航控制等关键环节和全周期控制。技术体系包括机组分类、核心及辅助部件技术。面临低风速适应性、复杂工况稳定性等挑战, 有相应解决方案。前沿方向包括高空风能开发、无叶片风力机、智能化运维及多能互补系统, 如风光储联合供电、氢能制备与风力发电耦合等。

关键词: 风力发电机; 风力发电; 控制技术

引言: 在全球能源转型的大背景下, 风力发电作为清洁能源的重要力量, 正发挥着愈发关键的作用。其发展历程历经技术革新, 已形成完备体系, 涵盖工作原理、技术分类、核心部件及辅助系统等多方面。然而, 风力发电也面临低风速适应性、复杂工况稳定性等诸多挑战。如今, 高空风能开发、无叶片风力机等前沿方向正不断探索, 推动风力发电迈向新高度。

1 风力发电机工作原理

1.1 能量转换链

风能捕获是能量转换的初始环节, 叶片翼型设计对气流的升力与阻力作用直接影响风能利用效率。叶片剖面形状决定气流流经时的压力分布状态, 当气流通过叶片表面时, 上下表面压力差形成气动升力, 同时气流黏性产生阻力, 升力与阻力的合力在风轮旋转方向形成驱动转矩, 使风轮克服静止惯性开始旋转。机械能传递依托主轴与齿轮箱的转速匹配机制, 主轴将风轮捕获的机械扭矩传递至齿轮箱输入级, 齿轮箱内部通过行星轮系与平行轴轮系的多级组合实现增速功能, 使输出轴转速达到发电机要求的同步转速范围, 同时保证扭矩特性与发电机转子机械特性相匹配^[1]。电能生成遵循发电机定子与转子的电磁感应过程, 转子旋转时产生旋转磁场, 定子绕组切割磁感线, 在闭合回路中感应出电动势, 当定子绕组接入外部电路时形成电流输出, 完成从机械能到电能的最终转换。

1.2 关键控制环节

变桨调节通过桨距角动态调整以优化功率输出, 当风速低于额定风速时, 控制系统保持最佳桨距角使风轮具有最大风能捕获系数, 当风速超过额定风速后, 变桨系统驱动叶片绕其轴线旋转增大桨距角, 减小叶片攻角从而降低风轮气动转矩, 使发电机输出功率稳定在额定值附近。偏航控制实现机舱方位实时校准以最大化迎风面积, 风向传感器连续检测主风向变化, 当风向偏差超

过设定阈值时, 偏航驱动装置启动带动机舱水平旋转, 使风轮平面始终对准主风向, 偏航动作完成后偏航制动器锁定机舱位置, 防止机舱自由摆动。功率限制涵盖超速保护与切出风速响应机制, 当风速超过切出风速或发电机转速超过安全阈值时, 控制系统立即触发保护程序, 变桨系统快速顺桨减小风轮气动转矩, 同时机械制动器按预设程序动作, 确保机组在极端风况下安全停机。

1.3 运行状态管理

全周期控制逻辑涵盖启动、并网、发电、停机等运行阶段, 启动阶段控制系统自检各传感器状态和液压系统压力, 满足条件后变桨系统调整桨距角至启动位置, 风轮开始加速旋转。并网阶段发电机转速接近同步转速时, 变流器调节输出电压幅值频率与电网一致, 完成同期合闸操作。发电阶段根据实时风速变化动态调整发电机转矩和桨距角, 维持机组在最优运行曲线上。停机阶段分为正常停机和紧急停机两种模式, 正常停机通过变桨系统逐步增大桨距角降低风轮转速, 待转速降至设定值后机械制动器动作, 紧急停机由安全链直接触发, 变桨系统以最大速率顺桨, 制动系统快速抱轴^[2]。故障检测与安全链触发条件基于传感器网络采集的振动、温度、转速、功率等参数, 与预设阈值比较后生成状态判断, 当参数超出安全范围时安全链动作, 切断能量传输路径并执行紧急停机程序。

2 风力发电技术体系

2.1 风力发电机组分类

按传动结构分为双馈式、直驱式和半直驱式机组, 双馈式机组采用齿轮箱增速与双馈异步发电机组组合, 变流器容量仅为发电机额定功率的一部分, 具有成本较低和重量较轻的特点。直驱式机组取消齿轮箱环节, 发电机直接由风轮轴驱动, 减少了机械传动损耗和潜在故障点, 但发电机极数较多导致体积和重量较大。半直驱式机组采用单级或多级齿轮箱与中速永磁发电机组组合, 在

结构紧凑性和系统可靠性之间寻求平衡点。按转速调节分为恒速恒频与变速恒频技术,恒速恒频机组发电机直接并网运行,转速基本保持恒定,变速恒频机组通过全功率变流器或双馈变流器调节,发电机转速可在较宽范围内变化。按应用场景分为陆上与海上机组,陆上机组受运输尺寸和安装起重能力限制,单机容量和叶片长度相对受限,海上机组基础结构形式多样,防腐防护等级要求较高,单机容量持续向大型化发展。

2.2 核心部件技术

叶片技术聚焦碳纤维复合材料应用与气动外形优化,碳纤维材料密度小强度高模量大,应用于叶片主梁等承载结构可显著减轻叶片重量,气动外形优化通过翼型族设计和三维流动控制实现,沿叶片展向分布不同翼型以适应各截面速度分布。发电机技术涉及永磁同步与电励磁同步发电机的效率特性比较,永磁同步发电机使用稀土永磁材料建立磁场,励磁损耗为零效率较高,电励磁同步发电机通过励磁电流调节磁场,励磁功率可控但存在励磁损耗^[5]。齿轮箱技术包括行星齿轮传动与故障预测维护技术,行星齿轮传动具有结构紧凑传动比大的特点,故障预测维护通过油液分析和振动监测判断齿轮轴承状态。变流器技术涵盖全功率整流逆变与电网兼容性控制,全功率变流器将发电机输出的变频电能整流为直流再逆变为工频交流,电网兼容性控制包括有功无功调节和故障穿越能力实现。

2.3 辅助系统技术

冷却系统涉及空冷与液冷方案的散热效率对比,空冷方案通过风扇强制空气流经散热器带走热量,结构简单但散热效率较低,液冷方案采用冷却液循环带走热量,散热效率较高但系统复杂。液压系统包括变桨驱动与机械制动的可靠性设计,变桨驱动通过液压缸或液压马达控制叶片角度,机械制动采用液压钳夹紧制动盘实现制动功能,可靠性设计涉及冗余配置和密封防护。监控系统涵盖振动监测与数字孪生技术的应用,振动监测通过加速度传感器采集关键部件振动信号,分析频谱特征判断设备状态,数字孪生技术构建机组虚拟模型,实时映射实际运行状态。

3 风力发电技术挑战与解决方案

3.1 低风速环境适应性

叶片轻量化通过碳纤维与玻璃纤维混合铺层设计实现,降低转动惯量,使叶片在低风速下更易启动。翼型族选择注重低雷诺数气动性能,采用渐变翼型设计,根部厚翼型保证强度,尖部薄翼型提升效率。叶片表面粗糙度控制减少污染物附着,前缘保护涂层延缓侵蚀。最

大功率点跟踪算法优化引入风速前馈和转矩查表控制,减少跟踪滞后与功率振荡。变流器控制策略配合算法,降低开关频率,优化调制方式,提高功率转换效率。控制参数自适应调整,根据风况特征优化响应速度与控制精度。停机启动策略优化通过风速趋势预测减少启停次数,降低机械磨损与电能损耗。

3.2 复杂工况稳定性

海上机组抗台风结构强化塔架基础,采用大直径钢管桩与加强筋,提高抗弯刚度。机舱与叶片密封设计防止海水侵入,机舱罩设排水通道,叶片根部设防雨环。腐蚀防护采用涂层体系与阴极保护,塔架与基础钢结构涂环氧富锌底漆与聚氨酯面漆,水下部分配置牺牲阳极或外加电流阴极保护^[4]。电气设备防护等级提升至IP65以上,机舱内设除湿机防止凝露。极寒环境下,叶片材料选用增韧环氧树脂,结构钢选用耐低温牌号,关键部件配置加热系统,防止结冰与脆裂。高温环境下,发电机与变流器采用水冷与空冷结合方案,增强散热能力。润滑系统选用全合成高温润滑脂,电气元件降额使用,塔架与叶片涂覆热反射涂料,减少太阳辐射吸收。

3.3 电网接入与消纳

功率预测结合数值天气预报与统计学习,短期预测基于中尺度数值模式,超短期预测采用时间序列分析,提高预测精度。储能系统协同控制根据预测误差与电网指令充放电,平抑风电功率波动。储能配置功率型与能量型组合,超级电容器响应快速波动,锂离子电池进行小时级能量时移。协同控制策略兼顾荷电状态管理与寿命优化,避免过充过放。虚拟同步机技术模拟同步发电机惯量与阻尼特性,变流器控制算法引入虚拟惯量环节与下垂特性,支撑电网频率稳定。虚拟惯量参数自适应调整,高风速时提供较大惯量支撑,低风速时维持基本响应能力。虚拟同步机还参与电网无功电压调节,改善局部电压稳定性。故障穿越能力实现电网电压跌落期间机组不脱网,变流器控制优化有功无功电流分配,提供无功支撑加速电压重建。

3.4 全生命周期成本

模块化设计通过功能模块划分与接口标准化降低维护成本,机组划分为叶片、机舱、塔架、变流器等模块,接口尺寸与连接方式统一设计,便于现场更换故障模块,减少停机时间。标准化部件通用性强,减少备件库存种类与仓储成本。维护操作流程简化,降低对维护人员技能要求,减少人为操作失误。退役机组回收与材料再利用方面,叶片通过机械破碎与高温热解分离玻璃纤维与树脂基体,回收纤维用于非承重构件或建筑材料。塔架

与基础钢材分类回收后重新熔炼,保持钢材性能。齿轮箱与发电机部件拆解后,可用零件检测修复后作为备件再制造,不可用零件按材料分类回收金属。永磁材料通过氢爆碎与化学萃取提取稀土元素氧化物,重新制备钕铁硼磁粉。基础混凝土破碎筛分后生产再生骨料,用于新建基础垫层或道路路基。润滑油与液压油通过沉降过滤与分子筛脱水工艺再生,循环使用,减少废油处置成本。

4 风力发电技术前沿方向

4.1 高空风能开发

浮空式风力发电装置的气动与结构创新采用轻质高强度复合材料构建浮升一体化结构,浮力气体选用氦气提供静态升力,气动外形采用环形机翼或涵道风扇设计兼顾浮力维持和风能捕获需求,浮空平台通过系绳与地面绞盘连接实现工作高度调节。系绳传输与地面电站的能量转换效率涉及系绳内部导体输送电能或通过高压工质传递能量两种技术路线,导体传输采用碳纤维复合芯导线降低自重提高载流量,工质传递通过高压气体驱动地面透平发电,地面电站将接收的能量转换为电网适用电压频率并入电网^[5]。

4.2 无叶片风力机

涡旋诱导振动发电的物理机制与材料需求基于流体力学中钝体绕流产生卡门涡街原理,当气流经过圆柱或棱柱钝体结构时交替产生涡旋脱落诱导结构振动,通过压电材料或电磁感应装置将振动机械能转换为电能。结构强度与发电功率的平衡设计通过调节结构刚度和阻尼特性控制锁定区振动频率和幅值,使涡旋脱落频率与结构固有频率在宽风速范围内保持匹配,维持稳定振动状态。

4.3 智能化运维

基于人工智能的故障诊断与预测性维护系统通过深度卷积神经网络分析振动频谱和温度场分布数据,与故障样本库对比识别齿轮磨损和轴承故障早期特征,根据特征演化趋势预测部件剩余寿命,维护计划根据预测结果优化安排在低风速时段进行。无人机巡检与自主修复

技术应用通过搭载可见光相机和红外热像仪的无人机沿规划航线自动巡检叶片和塔架,识别表面裂纹和雷击损伤后定位标记,由高空作业平台搭载的自主修复装置进行树脂灌注和表面打磨修补。

4.4 多能互补系统

风光储联合供电的能量管理策略根据风电光伏资源特性和负荷时序需求优化各单元出力分配,风电光伏优先供电,储能系统在发电过剩时充电吸收盈余电量,在发电不足时放电补充缺额,实现多时间尺度功率平衡。氢能制备与风力发电的耦合技术利用风电盈余电力通过质子交换膜电解槽制氢,氢气经压缩储存后用于燃料电池发电或作为工业原料外送,电解槽运行功率根据风电实时出力和电网约束动态调节,实现风电能量的长期储存和跨季节调节。

结束语:风力发电技术历经发展,已形成完整体系,涵盖工作原理、技术分类、辅助系统等多方面。虽面临低风速适应性、复杂工况稳定性等诸多挑战,但通过不断探索已有针对性解决方案。当下,高空风能开发、无叶片风力机等前沿方向正蓬勃兴起,智能化运维和多能互补系统也持续推进,未来风力发电技术有望不断突破,为能源转型和可持续发展提供更强有力的支撑。

参考文献:

- [1]郑育松.风力发电系统机械变频控制技术[J].装饰装修天地,2022,(23):390.
- [2]李胜,张兰红,单毅.永磁同步风力发电系统控制技术综述[J].微电机,2023,52(9):101-107.
- [3]石海滨.关于风力发电机及风力发电控制技术分析[J].民营科技,2021(09):70.
- [4]刘细平,林鹤云.风力发电机及风力发电控制技术综述[J].大电机技术,2022(3):17-20,55.
- [5]林键.风力发电及其控制技术新进展探究[J].中国设备工程,2021(13):221-223.