

# 风电并网稳定性分析与控制技术研究

周子强

华电新疆发电有限公司乌鲁木齐分公司 新疆 乌鲁木齐 830000

**摘要：**随着全球能源结构转型的推进，风力发电作为可再生能源的重要形式，其并网规模不断扩大。风电并网过程中的功率波动、电压稳定性以及谐波干扰等问题严重影响电网的安全运行，成为制约风电高效利用的关键因素。深入研究风力发电并网系统的稳定性问题及提升方法，对于保障电力系统运行安全、推动新能源技术发展具有重要的理论和实践价值。

**关键词：**风力发电；并网稳定性；控制系统优化

在风力发电领域，随着装机容量的不断增加，风力发电系统并网稳定性问题日益凸显。为了有效提升风力发电系统并网运行的稳定性，分析了当前风力发电并网过程中存在的典型问题及其影响机理。

## 1 风电并网技术特点分析

1.1 不同发电机组的并网技术特点。双馈异步发电机组。支持连续变速运行，风能转换效率高，且变流器仅需处理部分功率（约30%），显著降低硬件成本。并网过程无冲击电流，电能质量优异，功率因数可稳定在0.95（滞后或超前）。需通过滑环与电刷连接，存在机械磨损问题，维护频率较高。异步发电机（直接并网）。直接并网时，转速接近同步转速后自动接入电网，但冲击电流可达额定电流的5~9倍，易引发电压骤降。通过串联电抗器或自耦变压器降压并网，可平滑过渡并抑制电流冲击，但仍需额外无功补偿设备。同步发电机。电能质量优（频率稳定、无功输出可控），但并网需精确匹配电压幅值、频率及相位，对调速精度要求极高。结合变频装置可实现柔性并网，但成本较高，多用于新型大容量风电机组。半直驱发电机组。采用低传动比齿轮箱（对比双馈机型），降低机械损耗并延长寿命，同时永磁发电机在低转速下仍保持高效率。发电机尺寸紧凑、重量轻（较直驱机型减少20%以上），降低稀土材料用量和制造成本。

1.2 并网运行核心挑战与技术应对。出力随机性与波动性。风速变化导致功率输出波动，需结合风速预测算法与储能系统实现功率平滑。无功功率动态调节。异步机组运行时吸收无功功率，需配置动态无功补偿装置（如SVG、STATCOM）以满足电网需求。双馈机组通过变流器灵活调节无功输出，减少对外部补偿依赖。分散式接入与电网互动。多数风电场分散接入配电网，需优化本地消纳能力以减少远距离输电损耗。依赖区域电网

的备用容量支撑，如丹麦通过北欧互联电网实现风电高渗透率下的稳定性。

1.3 技术发展趋势。模块化设计与快速部署。单台风机安装周期短于3个月，10MW级风电场建设周期不超过1年，支持规模化扩展。智能化运行维护。自动化监控系统实现无人值守，结合大数据分析优化机组运行状态与故障预警。核心部件国产化。桨叶、齿轮箱、变流器等关键零部件国产化率提升，降低生产成本并提高供应链稳定性。

## 2 风电并网重要性分析

2.1 推动清洁能源转型。节能减排效应显著。百兆瓦级风电项目年上网电量可达1.9亿千瓦时，年等效节约标准煤6.2万吨，减少二氧化碳排放超17.4万吨，加速化石能源替代进程。风电并网通过绿色电力输送，直接降低区域碳强度，助力“双碳”目标实现。优化能源结构。风电并网使分散式可再生能源接入电网成为可能，减少对传统集中式电源的依赖，形成多能互补的新型电力系统。例如，西北地区通过风电高比例并网，显著提升非水可再生能源发电占比。

2.2 增强电力系统稳定性。技术突破保障电网安全。风电并网需通过电能质量测试（如谐波、电压波动分析）及低电压穿越（LVRT）能力验证，确保极端工况下机组与电网兼容性。我国首台66千伏变压器风电机组并网实践表明，新型集电系统设计可降低线路损耗，提升整体效率。消纳能力升级。针对风电大规模集中接入导致的消纳矛盾，智能调度系统扩容与输电线路智能化改造有效提升电网承载能力。例如，电网接纳能力升级后，项目并网时间缩短30%，缓解区域供需失衡问题。

2.3 带动产业经济协同发展。产业链辐射效应。风电建设周期创造数百个就业岗位，覆盖塔筒制造、设备维护等上下游产业，推动区域经济多元化发展。国产化突

破（如100%国产化16兆瓦海上风电机组）进一步降低供应链风险，形成技术输出能力。新兴市场培育。风电并网催生智能运维、能源管理等新兴职业需求，促进技术人才储备与专业化服务生态构建。风光储基地项目通过混排集电方案，为多种形式风电场设计提供实践样本，推动行业标准化进程。

2.4 技术创新驱动可持续发展。运维效率提升。智能监控系统结合大数据分析，实现风机运行状态实时优化与故障预警，减少停机损失。海上风电主轴轴承寿命延长至25年，大幅降低维护成本，提升全生命周期经济性。低碳基建模式推广。通过优化输电线路走向、采用低损耗设备等举措，风电项目全周期碳足迹降低20%以上，为新能源工程提供可复制的环保范式。

### 3 风电并网稳定性影响因素分析

3.1 频率稳定性。风电机组惯性响应不足。风电出力受风速随机性与间歇性影响，缺乏传统同步发电机的惯性支撑能力，导致电网频率调节响应速度降低。尤其在风速突变或负荷波动时，系统频率偏差风险显著增加。调频备用容量限制。双馈机组通常运行于最大功率跟踪模式，无法主动提供有功备用容量，削弱电网应对频率扰动的能力；而固定转速异步机组因机械特性限制，调频响应速度较慢。

3.2 电压稳定性。无功功率动态需求。异步感应电机运行时需持续吸收无功功率，若缺乏动态无功补偿装置（如STATCOM），局部电网电压可能跌落甚至崩溃。双馈机组虽可通过变流器调节无功输出，但受控制策略限制，调节范围有限。谐波与电压畸变。变流器开关频率与电网阻抗相互作用，产生特征谐波（如5、7次谐波），叠加风速波动引起的低频分量，导致母线电压波形畸变。

3.3 暂态稳定性。低电压穿越能力差异。传统异步机组在电网电压跌落时易因电磁转矩不足导致停机脱网，而双馈机组依赖变频器控制策略实现故障期间短时无功支撑，但控制延时可能引发暂态失步。故障电流特性变化。电力电子设备主导的故障电流幅值低、相位可控性差，与传统同步机组短路电流特性差异显著，影响继电保护动作的准确性和速动性。

3.4 电网结构关联性。接入位置与渗透率。风电集中接入电网薄弱节点（如远距离输电线路末端）时，电压稳定性对功率波动的敏感度提升，渗透率超过15%后系统稳定裕度快速下降。多场站交互影响。相邻风电场间通过公共连接点耦合，可能因控制参数失配引发次同步振荡或功率振荡，需通过广域阻尼控制抑制。

### 4 风电场布局与规模对并网稳定性的影响分析

4.1 布局特征对稳定性的影响。接入位置敏感性。风电场集中接入电网薄弱节点（如远距离输电线路末端）时，电压稳定性对功率波动的敏感度显著增强，易引发局部电压崩溃风险。例如，配电线路末端的大规模风电注入可能使潮流方向反转，导致原有线路热稳定裕度不足。分散式布局虽能降低单一节点压力，但多个接入点间的潮流交互可能引发次同步振荡，需通过广域协同控制抑制。拓扑结构与谐波耦合。采用链式或环形集电线路布局的风电场，其内部阻抗分布差异可能导致谐波放大现象，加剧电压畸变（如5、7次特征谐波）。海上风电采用高压柔性直流输电时，换流站布局需考虑电网短路容量匹配，避免因阻抗失配引发暂态过电压。

4.2 规模扩展对稳定性的挑战。渗透率阈值效应。当风电渗透率超过15%，系统等效惯性时间常数下降40%以上，频率调节能力显著弱化，尤其在负荷突变时可能触发低频减载装置动作。大规模风电场群出力叠加效应会抬高电网短路电流水平，传统继电保护装置可能因故障电流特征改变而误动。无功动态需求激增。异步感应机组占主导的大型风电场运行时，无功吸收量可达有功功率的20%~30%，需配置SVG或STATCOM等动态补偿装置以满足电压支撑需求。双馈机组虽具备部分无功调节能力，但其调节范围受变流器容量限制，超大型风电场仍需依赖外部无功电源协同控制。

4.3 协同优化策略。布局规划技术。基于灵敏度分析的接入点优选方法：通过电网节点电压/短路容量灵敏度排序，优先选择电气距离短、短路容量大的节点接入。混合储能布局：在风电场集电线路关键节点配置分布式储能，平抑功率波动并改善局部电压质量。规模控制技术。渗透率分级管控：根据电网承载能力动态调整风电出力上限，如在弱电网区域设置渗透率 $\leq 10\%$ 的硬性约束。虚拟同步控制：通过变流器模拟同步发电机外特性，为高比例新能源电网提供等效惯性支撑，提升频率稳定性。

### 5 风电并网稳定性分析方法

5.1 稳态稳定性分析。电压波动评估。通过潮流计算分析风电场并网后的母线电压偏差，量化节点电压敏感度与无功需求，评估电网电压调节能力。采用概率潮流模型，结合风速概率分布与机组出力特性，预测极端条件下的电压失稳风险。谐波与电能质量分析。基于谐波畸变率（THD）和特征谐波分量（如5、7次谐波）测量，评估变流器开关频率对电网波形的影响。采用闭环控制系统（如分布式谐波抑制算法），实时提取并网点

谐波分量并生成补偿指令值。

5.2 动态稳定性分析。频率响应建模。构建两阶段分布鲁棒优化模型，将系统频率安全约束嵌入机组组合调度决策，通过惯量、调频容量与风电功率备用控制的协同优化提升频率稳定性。量化风电渗透率对等效惯性时间常数的影响，评估负荷突变场景的频率跌落速率与最低点阈值。小干扰稳定性分析。建立包含风电机组控制模型、锁相环动态及电网阻抗的全阶系统模型，利用劳斯-赫尔维茨判据判别次同步振荡风险。通过特征值分析法研究串补线路参数与变流器控制参数的交互作用，确定关键振荡模式及阻尼比。

5.3 暂态稳定性分析。低电压穿越（LVRT）测试。基于电网电压跌落曲线（如0.2秒内跌落至15%额定电压），仿真验证双馈机组变流器无功支撑能力与撬棒电路保护策略的有效性。对比不同类型机组（异步、永磁直驱）在对称/不对称故障下的暂态响应特性，优化故障穿越控制逻辑。故障电流特性评估。分析电力电子设备主导的短路电流幅值与相位特性差异对继电保护动作的影响，提出自适应保护定值调整策略。

5.4 建模与仿真技术。机电暂态联合仿真。采用RT-LAB或PSCAD/EMTDC平台，建立包含详细变流器控制模型与电网动态的混合仿真系统，验证复杂工况下的系统稳定性。

## 6 风电并网的实践应用与挑战

6.1 实践应用。集中式海上风电并网。柔性直流输电技术：海上风电项目采用 $\pm 320\text{kV}$ 至 $\pm 500\text{kV}$ 柔性直流输电技术，实现远海风电大容量外送，单回通道传输容量达900MW至2000MW，输电距离超150km，显著提升了远海资源开发效率。智能运维系统：项目通过“进度计划+责任矩阵”双轴管理体系，完成27项核心任务动态管控，实现永久接入系统切换“零窗口期”，年等效满负荷小时数提升至1914小时。分散式陆上风电布局。混

塔技术突破：电力竹根滩项目采用160米混塔技术，通过三维数字建模与高精度激光校准系统，实现288段构件毫米级拼接，刷新平原地区混塔安装精度纪录。风电下乡模式：安徽省“千乡万村驭风行动”试点村集体参股模式，单村装机规模20MW以内，并通过共建共享机制实现每村年增收5万元以上，探索乡村风电开发新路径。

6.2 技术挑战。电网稳定性问题。柔性直流可靠性：受限直流海缆制造水平，远海风电大规模外送需解决混合直流输电谐波抑制及换流站海上平台体积优化问题，如N2项目通过对称单极结构降低平台重量15%。次同步振荡风险：高比例变流器接入导致电网阻抗特性改变，需部署广域阻尼控制器抑制多风电场交互引发的振荡，典型案例中振荡概率降低25%。功率波动调控：海上风电输出功率波动性（ $\pm 30\%$ 额定功率/小时）对频率调节提出更高要求，需虚拟同步控制技术模拟等效惯性支撑。环境与运维挑战。恶劣环境适配性：海上平台需耐受盐雾腐蚀、台风冲击等极端条件，如浙江苍南项目采用环境友好型防腐涂层技术延长设备寿命30%。高空作业精度：混塔安装需突破111米高空吊装误差控制难题，激光对中仪实时校准系统将偏差控制在 $\pm 2\text{mm}$ 以内。政策与协同矛盾。土地协调复杂化：风电下乡涉及多主体利益分配，安徽试点通过“村企合作”模式优化土地流转流程，但全国推广仍面临审批周期长等问题。

总之，风力发电系统并网稳定性关乎可再生能源的高效利用，其影响因素与提升策略的研究具有重要意义。通过针对性优化控制系统、改进电力电子技术及协调储能系统，已在提升动态稳定性与运行效率方面取得进展。

## 参考文献

- [1]刘华.风力发电并网技术及其稳定性研究.2023.
- [2]陈佳伟.风电并网稳定性分析与控制技术探讨.2023.