

新能源风力发电机组接入电网技术及其应用分析

李舒月

新疆华电苇湖梁新能源有限公司，新疆维吾尔自治区乌鲁木齐市，830000；

摘要：能源风力发电作为一种可再生、环保且可广泛利用的能源形式，已经受到广泛关注。新能源风力发电机组有效接入电网成为实现可持续发展和能源转型的关键挑战之一。新能源风力发电机组接入电网技术主要涉及电网系统设计、功率调度和控制、频率响应以及与传统发电方式的协同运行等方面，可以实现新能源风力发电系统的高效运行，提供稳定可靠的电力供应，满足日益增长的能源需求。

关键词：新能源；风力发电机组；电网技术

DOI：10.69979/3041-0673.25.12.023

分析新能源风力发电机组接入电网技术的应用情况，探讨该技术在实践中面临的问题，并针对此类问题给出解决方案，通过对电网稳定性的研究与改进，实现新能源风力发电的可靠供电，降低对传统发电方式的依赖，优化功率调度与管理，提高风力发电机组的输出效率和可靠性，提供稳定的电力供应，为有效推进新能源风力发电技术在电网中的应用提供指导。

1 新能源发电并网重要性

1.1 保障能源供应安全

缓解电力保供压力，新能源并网高峰可有效补充夏季用电缺口，如内蒙古 445 兆瓦风电项目年发电量 11.62 亿千瓦时，可满足约 77 万户居民需求，缓解空调负荷激增时期的电网压力。在迎峰度夏期间，新能源并网成为平衡电力供需的关键力量，尤其在高温干旱叠加夏播灌溉需求场景下作用显著。减少对外能源依赖，推动新能源规模化并网可优化能源结构，降低对进口化石能源的依赖（当前我国石油进口依赖度近 50%），增强能源自主可控性。

1.2 推动绿色低碳转型

减少碳排放，风光发电过程零碳排放，大规模并网可直接替代煤电。据测算，2030 年新能源装机占比将达 40%，2050 年提升至 53%，成为实现“双碳”目标的核心路径。改善环境质量，相比化石能源发电，新能源并网不产生氮氧化物等污染物，有助于解决雾霾等环境问题。

1.3 驱动经济增长

直接经济效益，新能源项目带动全产业链发展，如

50 兆瓦风电场年收益可达数千万元，并创造设备制造、运维服务等就业机会。光伏、风电投资回报期较长，但长期收益稳定，如分布式光伏并网项目通过电价政策保障投资者收益。区域协同发展，依托资源禀赋差异化布局：沿海地区发展海上风电（如英国霍恩西项目），内陆开发陆上风电（如内蒙古乌兰察布项目），形成“发电-输电-消纳”区域经济循环。

1.4 增强电力系统韧性

多能互补提升可靠性，风光储混合系统可平抑新能源出力波动，弥补传统电源调频能力不足的缺陷。政策与技术协同，国家能源局要求电网企业执行“应并尽并、能并早并”原则，允许分批并网，加速项目投产。通过低电压穿越技术、动态无功补偿装置（如 STATCOM）提升电网对新能源波动的适应性。

2 新能源风力发电并网接入技术

2.1 新能源风力发电并网接入电气连接保护装置

新能源风力发电的并网接入涉及复杂的电气连接与保护装置配置，其核心在于确保安全可靠电能传输及系统稳定性。保护装置配置，运行保护，低电压穿越（LVRT）：确保电网电压骤降时风机不脱网，通过动态无功补偿（如 STATCOM）维持电压稳定。频率调节：电力电子设备实现毫秒级调频响应（ $\leq 500\text{ms}$ ），抑制电网频率波动。故障保护，继电保护特殊性：需适应双向潮流（风机短时电动机运行导致潮流反向）；风机短路电流受限（690V 侧阻抗折算至高压侧后呈大电抗特性），需定制保护策略。配置方案：集电线路设距离保护+零序电流保护；主变压器配置差动保护+后备过流保护。防脱网措施，同步发电机并网需配置变频装置实现相位

同步；异步发电机采用软并网技术（晶闸管控制冲击电流 ≤ 2 倍额定电流）。

2.2 新能源风力发电并网接入电网稳定性考量

新能源风力发电并网接入对电网稳定性的考量需综合技术规范、风险机制及应对策略，电压稳定性考量，无功补偿需求，风电功率波动导致电压闪变，需配置静止同步补偿器（STATCOM）或 SVC 动态调节无功功率，抑制电压偏差。双馈风机通过转子侧变频器暂态电压控制，提升故障期间电压稳定性。低电压穿越（LVRT）能力，电网电压骤降时，风机需在 500ms 内维持并网，防止连锁脱网事故。频率稳定性挑战，功率波动影响，风速突变导致有功功率波动（如 10 秒内变化超 10% 额定功率），引发电网频率偏差（ $\pm 0.5\text{Hz}$ 以上）。传统同步机组旋转备用容量不足时，频率崩溃风险上升。调频技术强化，风机电力电子设备需具备毫秒级一次调频响应（ $\leq 500\text{ms}$ ），替代火电机组惯性支撑。强制配储政策：储能系统平抑功率波动，如抽水蓄能响应滞后补偿。新型稳定风险，谐振不稳定问题，电力电子设备负电阻效应引发宽频振荡（0.1–1000Hz），如河北沽源风电场次同步谐振事故。解决方案：全网谐振稳定性评估+阻抗重塑技术。潮流分布改变，大规模风电接入改变电网潮流方向，导致局部线路过载或短路电流超标。继电保护需适配双向潮流特性，定制距离保护+零序电流保护策略。

2.3 新能源风力发电并网接入电压频率相位匹配

电压匹配技术，电压等级转换，风机出口电压（通常 690V）经箱变升压至 35kV 或更高等级，匹配电网电压（如 220kV），减少传输损耗。特殊设计：海上风机将干式变压器集成于机舱内，提升盐雾环境适应性。动态电压调节，配置 STATCOM 或 SVC 动态补偿无功功率，抑制风电波动导致的电压闪变。低电压穿越（LVRT）能力：电网电压骤降时，500ms 内维持并网，防止连锁脱网。频率同步控制，频率稳定性保障，风速突变导致功率波动（10 秒内变化超 10% 额定功率），需电力电子设备实现 $\leq 500\text{ms}$ 的毫秒级调频响应。并网频率容差：通常要求偏差 $\leq \pm 0.5\text{Hz}$ （部分标准如 FD82 型风机要求 $\pm 1\%$ ）。同步机制，锁相环（PLL）技术：实时追踪电网相位，控制变流器输出与电网相位一致。自同步电压源技术：赋予新能源机组自主构建电压频率能力，模拟传

统火电惯性支撑。失配风险与防护，相位失步影响，相位偏差超限引发环流，导致设备过热（如双馈风机转子过电流）。负序电流产生反向旋转磁场，威胁绕组绝缘和变流器安全。保护措施，设置相位差跳闸阈值（如 $\leq 6^\circ$ ），实时监测矢量偏移；配置距离保护+零序电流保护，适配双向潮流特性。

3 新能源风力发电并网控制技术

3.1 核心同步控制技术

电压/频率/相位匹配，锁相环（PLL）技术：实时追踪电网相位，控制变流器输出与电网同步，相位偏差需 $\leq 5^\circ$ 。软并网控制：通过晶闸管逐步导通限制冲击电流（ ≤ 2 倍额定值），渐进匹配相位，适用于异步发电机。预同步检测：并网前校正风机输出电压幅值、频率及相位，差值达标后闭合开关。构网型（GFM）技术突破，金风科技 GW155–4.5MW 构网型风机通过国内首个 T/CEEIA 804–2024 标准检测，可自主构建电压频率，模拟传统火电惯性支撑。混合风电场中，GFM 机组体现“正电阻”特性，可抵消跟网型（GFL）变流器的负阻尼效应，提升弱电网稳定性。

3.2 稳定性保障技术

低电压穿越（LVRT）强化，双馈风机采用定子电流微分前馈控制，抑制电网故障时的转子过电流，确保 500ms 内不脱网。强制符合 GB/T 19963 标准，要求风机在电压骤降至 20% 额定值时维持运行。虚拟惯量控制，改进型虚拟惯量策略（如基于高通/低通滤波器）平抑直流母线电压波动，缓解负荷扰动影响。电力电子设备实现 $\leq 500\text{ms}$ 快速调频响应，替代同步机组惯性支撑。谐振抑制技术，针对次同步振荡（0.1–1000Hz），通过全网谐振稳定性评估+阻抗重塑技术抑制负电阻效应。

3.3 新型并网模式创新

绿电直连模式，新能源通过专用线路直供单一用户，实现物理溯源，减少电网层级变换，提升消纳效率。国家发改委明确并网型/离网型两类项目技术边界，推动就近消纳。柔直并网技术，解决远海风电输电难题，直流汇集降低交流电缆电容效应引发的无功问题，提升传输效率。

4 新能源风力发电同步与功率平衡

4.1 风电同步机制与传统电源差异

传统同步特性缺失，风电变流器接口使风机不具备同步发电机固有的功角特性，无法自然响应系统频率变化。常规风机以“最大功率点跟踪（MPPT）”运行为主，无旋转备用容量，削弱系统惯量支撑能力。虚拟同步控制（VSG）技术，通过电力电子控制模拟同步机特性：虚拟转子运动方程：建立电磁转矩与机械转矩平衡关系；虚拟调速器/励磁器：实现频率-功率下垂控制。应用效果：金风 GW155-4.5MW 构网型风机通过 T/CEEIA 804-2024 认证，可为弱电网提供正阻尼。系统级协调，风电场集群控制：虚拟电厂聚合多风机，通过高精度功率预测（误差 $\leq 15\%$ ）实现跨区域调度；源网荷储协同：配置储能系统（如抽水蓄能）平抑功率波动，补偿风电分钟级调节滞后；电动汽车 V2G 技术参与实时调度，填补功率缺额。

4.2 关键技术挑战与突破

惯量支撑不足，高渗透率风电导致系统等效惯量下降，频率变化率（RoCoF）超标风险上升。突破点：VSG 参数优化（如遗传算法整定最优虚拟惯量），平衡调频成本与效益。次同步振荡风险，变流器负阻尼特性引发 0.1-1000Hz 宽频振荡（如河北沽源风电事故）。抑制方案：阻抗重塑技术+全网谐振稳定性评估。相位同步精度，锁相环（PLL）相位偏差需 $\leq 5^\circ$ ，否则引发环流和设备过热。新型方案：多功能变流器集成电压质量调节与并网功率调控，减少设备冗余。

5 新能源风力发电电能质量保障

电压稳定性控制。动态无功补偿，配置 STATCOM/SVG 设备实时调节无功功率，抑制因风速突变导致的电压闪变，响应时间 $\leq 20\text{ms}$ 。新风光 SVG 产品支持高低电压穿越（范围优于国标），电网电压骤降至 20%时仍维持并网。集群协同调压，多台风电机组通过共母线协调控制，实现无功功率均衡分配，保障并网点电压偏差 $\leq \pm 10\%$ 。

案例：电网午间负荷峰值期，新能源出力占比 33.12%，有效支撑电压稳定。预测优化：风电场群功率预测误差 $\leq 15\%$ ，减少调度偏差引发的电压波动。

6 新能源风力发电技术应用与挑战

6.1 前沿技术应用进展

陆上风电创新，大型化与智能化，金风科技 GWH204 Ultra 机型发电量提升 8%~10%，远景能源 Model T

Pro 采用碳纤维塔筒降低全生命周期成本 18%。“千乡万村驭风行动”推动乡村风电普及，2025 年预计 14 省试点新增装机 200 万千瓦。垂直轴风机突破，索力德突破兆瓦级垂直轴技术瓶颈，解决低噪音、复杂地形适应性难题，拓展分布式场景应用。海上风电突破，深远海漂浮式技术，中电建万宁漂浮式项目 2025 年底投产 6 台机组，标志技术从试验迈向批量应用。全球首个风渔融合项目（福建莆田）完成安装，开启深远海资源综合开发新模式。柔直并网与黑启动，如东项目应用柔直输电降低损耗 15%；运达 16MW“海鹰”平台实现孤岛黑启动连续运行 180 天，首创双馈机组黑启动能力。系统级技术整合，风光储一体化，2024 年系统效率达 72%，AI 功率预测精度 95%+，弃风弃光率压降至 3%以下。液冷储能 PUE 降至 1.1，全钒液流电池成本降至 2 元/Wh 支撑长时调峰。构网型（GFM）规模化，金风 GW155-4.5MW 通过 T/CEEIA 804-2024 认证，为弱电网提供正阻尼支撑，2025 年渗透率目标 $\geq 30\%$ 。

并网与消纳瓶颈，限电弃风加剧，光伏午间强制停发 3~6 小时，西北弃风率达 10%~30%。系统适配不足，“三北”地区弃风率反弹至 8%，配储比例不足 20%；加快跨区输电通道与抽水蓄能建设。技术可靠性风险，宽频振荡隐患，变流器负阻尼引发 0.1-1000Hz 次同步振荡（如河北沽源事故），需阻抗重塑技术+全网谐振评估。极端环境耐受性，深远海高盐雾、台风场景设备故障率升高，运达升级 5G+北斗架构提升稳定性。生态与贸易冲突，环保争议，美国东海岸项目因候鸟保护诉讼停滞，需开发超声波驱鸟及可回收叶片技术。供应链博弈，美欧碳关税政策推动产业链区域化，中国风电出口占比 35%但主轴承仍依赖进口。

总之，通过解决电网稳定性问题，优化功率调度与管理以及改进频率响应能力，新能源风力发电机组接入电网技术可以实现可靠供电，降低对传统发电方式的依赖，提高新能源风力发电的可持续性和经济性，为推进新能源风力发电技术在电网中应用提供了指导和解决方案。

参考文献

- [1] 郭国萍. 风力发电机组振动故障分析及运用研究. 2023.
- [2] 胡成宇. 风力发电机组的检修技术应用与对策分析. 2022.