

风力发电系统并网控制技术研究

春 辉

西安西电新能源有限公司 陕西 西安 710075

摘 要：文章聚焦分散式及微电网风力发电系统并网控制技术研究。概述了分散式风力发电系统的构成与优势，阐述并网逆变器控制、最大功率点跟踪、低电压穿越、离并网切换等关键并网控制技术，分析其在户用小型风电系统、微电网协同控制及基于重复控制的逆变器仿真中的应用。最后探讨智能控制算法的适配应用及储能-风电协同控制模式，为分散式风电高效稳定接入微电网提供参考。

关键词：分散式风力发电；微电网；并网控制技术；离并网切换；储能协同

1 风力发电系统概述

风力发电系统是将风能转化为电能的清洁能源装置，其中分散式风力发电因适配分布式能源场景，成为微电网建设的核心组成部分。该系统以小型化、分布式为特征，主要由小型风力发电机组（10kW-1MW）、控制器、并网逆变器、储能单元及本地负荷构成。小型风力发电机组多采用直驱永磁结构（省去齿轮箱），叶片根据低空风能特性优化设计，通过轮毂直接驱动永磁发电机将机械能转化为电能；控制器实时监测风速、机组转速及负荷状态，动态调节桨距角以匹配风能利用需求；并网逆变器负责直流-交流转换，确保输出电能符合微电网电压、频率标准；储能单元（如锂电池、超级电容）则平抑出力波动，提升供电稳定性。

分散式风电系统具有显著优势：安装灵活，可依托农户、工业园区、偏远村落等场景就近部署；输电距离短，线损率低于5%，能源利用效率高；可与光伏、储能组成微电网，实现离网运行，解决无电地区供电问题。随着微电网技术的发展，分散式风电的并网控制需求从“单纯接入”转向“协同优化”，其技术适配性成为微电网稳定运行的关键^[1]。

2 风力发电并网控制技术

2.1 并网逆变器控制技术

并网逆变器是分散式风电接入微电网的核心接口设备，需适配微电网电压波动大、负荷变化频繁的特点。其核心功能是将发电机输出的直流电（或变频交流电整流后）转换为与微电网同频同相的交流电，常用拓扑结构为单相或三相全桥逆变器，控制策略以电流源型控制为主，适配微电网的动态响应需求。电流源型控制通过精确跟踪微电网电压相位，调节输出电流幅值与波形，实现单位功率因数并网。具体采用“PI控制+电网同步”双闭环方案：外环为功率/电压控制，根据微电网负荷需

求设定电流参考值；内环为电流跟踪控制，通过PI调节器或滞环控制实现电流精准跟踪。针对微电网电压畸变问题，引入谐波补偿环节，通过dq轴分解提取谐波分量并生成补偿电流，将总谐波畸变率（THD）控制在5%以内。与集中式风电相比，分散式风电逆变器容量小（≤1MW），更注重低成本与可靠性，多采用模块化设计，支持多台并联运行以扩展容量，同时具备过压、过流、孤岛效应保护功能。

2.2 最大功率点跟踪（MPPT）技术

最大功率点跟踪技术是提升分散式风电能效的核心手段，因低空风速波动性更强（日变化幅度可达2-10m/s），需采用响应速度快、鲁棒性强的控制方法。常见适配技术包括爬山搜索法、功率反馈法及改进型扰动观察法。爬山搜索法无需机组参数，通过周期性微调发电机转速（或逆变器输出功率），根据功率变化趋势调整搜索方向，适用于小型户用风电系统，优点是算法简单、成本低，缺点是风速突变时易出现误判。功率反馈法则基于发电机功率-转速特性曲线，通过实时对比实际功率与最优功率的偏差，调节PWM占空比，响应速度较爬山法提升30%，多用于100kW以上的分散式机组^[2]。改进型扰动观察法引入风速预判机制，结合短期风速预测数据优化扰动步长，在风速波动频繁的微电网场景中，MPPT效率可达92%以上，较传统方法提升5-8个百分点。

2.3 低电压穿越（LVRT）技术

分散式风电接入微电网时，需具备低电压穿越能力以应对微电网故障（如短路、负荷突变）导致的电压跌落。与集中式电网不同，微电网电压跌落幅度更大（可达30%-60%）、持续时间更长（0.5-2s），因此LVRT控制需兼顾设备保护与微电网稳定。针对100kW以下的小型直驱风电系统，LVRT采用“逆变器控制+卸荷保护”的复合方案：当检测到微电网电压跌落时，逆变器立即

降低有功功率输出,同时通过无功电流注入(如SVG功能)支撑微电网电压;若直流侧电压超过阈值(通常为额定值的1.2倍),激活直流侧卸荷电阻,消耗多余能量以保护电容与开关管。对于微电网中的多台分散式风电,采用“集中协调+本地响应”模式:微电网控制器统一分配各机组的无功支撑任务,避免无功功率对冲,确保电压恢复过程平稳。实际测试表明,该方案可实现电压跌落至额定值40%时持续并网运行1s以上,满足微电网故障穿越要求。

2.4 离并网切换与微电网协同控制

离并网切换是分散式风电适配微电网的关键技术,需实现“并网-离网”模式的无缝切换(切换时间 $\leq 20\text{ms}$),避免对本地敏感负荷(如通信设备、精密仪器)造成冲击。切换控制采用“预同步+无扰动过渡”策略:并网转离网时,先通过锁相环跟踪本地负荷电压,调节逆变器输出电压与负荷电压同步后断开并网开关;离网转并网时,检测微电网电压恢复正常后,通过功率平滑调节逐步增加并网功率,实现无冲击过渡。在微电网协同控制中,分散式风电需与光伏、储能协同运行:通过微电网能量管理系统(EMS)采集风电出力、光伏功率及负荷数据,采用模型预测控制算法优化功率分配;当风电出力过剩时,优先向储能单元充电;出力不足时,由储能放电补充,确保微电网功率平衡^[3]。

3 风力发电并网控制技术

3.1 户用小型直驱风电系统并网控制

户用场景(1-10kW)的分散式风电以单相并网为主,其控制核心是低成本与高可靠性。采用“一体化控制器+微型并网逆变器”方案:控制器集成MPPT与逻辑控制功能,通过蓝牙与手机APP联动,实现风速、功率等参数的实时监控;逆变器采用高频隔离拓扑,体积小、重量轻($\leq 5\text{kg}$),适配家庭安装环境,同时具备孤岛保护、过温保护等多重安全功能。以5kW户用直驱永磁风电系统为例,其并网控制采用改进型扰动观察法实现MPPT,逆变器采用PI+重复控制复合策略,输出电流THD控制在3%以内,满足国家GB/T19963.1-2021标准要求。实际运行数据显示,该系统在3-8m/s风速下的风能利用系数(C_p)可达0.42,年发电量约8000kWh,可满足家庭60%的用电需求。

3.2 基于重复控制(RC)的并网逆变器仿真

分散式风电逆变器需适应微电网电压畸变、负荷冲击等复杂工况,重复控制因其对周期性扰动的抑制能力,成为提升控制精度的关键技术。基于MATLAB/Simulink搭建100kW并网逆变器仿真模型,核心包括主

电路(三相全桥逆变器、LC滤波器)与控制电路(锁相环、PI控制器、重复控制器)。重复控制器采用25kHz采样频率,周期存储器长度匹配电网基波周期(20ms),通过补偿器抑制系统延迟带来的稳定性问题。仿真测试表明:在微电网电压含3次、5次谐波(总畸变率8%)的工况下,传统PI控制的输出电流THD为6.2%,而PI+重复控制的THD降至2.8%;当负荷突变(从50%增至100%)时,系统动态响应时间从0.3s缩短至0.15s,验证了重复控制在分散式风电逆变器中的适配性。

3.3 微电网中多机协同并网控制

在工业园区微电网的复杂场景中,多台分散式风电系统(单台装机容量达200kW)需与光伏电站、储能装置以及工业负荷紧密协同运行,以确保整个系统的稳定运行与高效供电。针对这一挑战,构建一个“集中监控与分布式控制相结合”的先进架构。在这一架构中,微电网能量管理系统(EMS)扮演了集中监控中心的角色。它利用4G或LoRa等通信手段,实时采集并整合各风电系统的运行数据。基于这些数据,EMS能够智能地计算出每个风电系统应承担的目标功率,并将这些指令精准地下发给各个系统。与此同时,每个风电系统的本地控制器则作为分布式控制节点,负责执行EMS下发的指令,并通过MPPT技术精确调节实际输出功率。若实际出力与目标值出现超过5%的偏差,本地控制器会迅速启动储能系统的充放电功能进行补偿。另外,在微电网遭遇电压跌落等异常情况时,EMS还能迅速协调各风电系统同步注入无功功率,共同支撑电压的快速恢复。

4 风力发电并网控制技术创新方向

4.1 智能控制算法的适配应用

针对分散式风电的强波动性,智能控制算法在提升系统鲁棒性方面展现出巨大潜力。模糊控制无需精确数学模型,它巧妙地将风速、功率偏差等关键参数模糊化,并建立“if-then”控制规则。在浙江某山区户用小型风电系统的MPPT控制中,这一方法成效显著。当风速突变时,其跟踪精度较传统方法提升了10%-15%,有效保障了小型风电系统的稳定运行。神经网络控制同样表现卓越,通过BP神经网络对风电系统动态特性精准建模,再结合LSTM网络预测短期风速(预测时长10-30min),提前调整逆变器控制参数,大幅减少风速波动对并网功率的影响。在江苏沿海某微电网测试中,基于LSTM的预测控制使风电出力波动标准差降低了20%。另外,遗传算法可用于优化PI控制器参数,通过不断迭代搜索最优参数组合,使系统动态响应速度提升了25%,超调量降低至5%以下,显著提升了风电并网的控制性能^[4]。

4.2 储能技术与风力发电并网控制的深度融合

储能是解决分散式风电间歇性的核心手段，二者深度融合能极大提升微电网供电稳定性。依据分散式风电的出力特性，在云南某偏远山区选择“锂电池+超级电容”混合储能拓扑。锂电池能量密度达150-200Wh/kg，承担长时间（1-4h）功率补偿任务；超级电容功率密度为5-10kW/kg，可快速应对短时（0-10s）出力突变。在控制策略上，采用“功率分流”机制，通过低通滤波器将风电出力分解为低频分量（由锂电池跟踪）与高频分量（由超级电容补偿）。当微电网离网运行时，储能系统作为主电源维持电压频率稳定，风电系统则按最大功率指令运行，实现“源储协同”供电。在该偏远村落微电网中，100kW分散式风电与300kWh锂电池+50kW超级电容混合储能融合运行，离网状态下供电可靠性高达98.5%，完全满足村民基本用电需求。

4.3 风力发电并网控制技术的实际效益与未来发展

风力发电并网控制技术的实际应用不仅显著提升了微电网的稳定性和灵活性，还为乡村及偏远地区的能源自给自足提供了有力支持。具体而言，这些技术的应用有效降低了微电网的停电频率和停电时间，提升了电力质量和用户满意度。在某偏远乡村微电网的实证研究中，通过实施先进的并网控制技术，电网的供电可靠性提高了近20%，年停电时间减少了50%以上，这对当地居民的生活和当地产业的发展均产生了积极影响。另外，这些技术的应用还促进了绿色能源的高效利用，减少了化石能源的消耗，对环境保护和气候变化应对具有重要意义。例如，在工业园区微电网项目中，通过风能与储

能的协同控制，不仅确保了电力的稳定供应，还显著降低了碳排放，为企业的可持续发展贡献了力量。

未来，风力发电并网控制技术将进一步向智能化、网络化方向发展。随着物联网、大数据、人工智能等技术的不断成熟，风力发电系统将能够实现更加精准的控制和优化，进一步提升能源利用效率。同时，分布式能源系统的广泛部署和协同运行，将推动能源互联网的形成，实现能源的智能化管理和优化配置。

结束语

分散式及微电网风力发电的并网控制技术需围绕“小型化、分布式、协同化”核心需求展开，通过优化并网逆变器控制、MPPT策略及离并网切换逻辑，适配微电网的复杂工况。未来需进一步推动智能控制算法的低成本落地，深化储能与风电的协同控制，完善微电网多能互补机制，从而提升分散式风电的能源利用效率与并网稳定性，为分布式能源体系建设及乡村振兴提供能源支撑。

参考文献

- [1]李伟,井兴洋.控制技术在风力发电系统中的应用[J].中国高新科技,2022,(16):144-146.
- [2]赵雷,孙琳.风力发电系统谐波特性分析及抑制方法研究[J].电力系统保护与控制,2022,50(4):56-62.
- [3]林刚,马超.基于粒子群优化的风力发电系统谐波抑制方法[J].电力电子技术,2021,55(12):89-94.
- [4]朱立,高峰.风力发电并网过程中谐波的抑制与优化控制策略[J].可再生能源,2023,41(6):73-80.