

风力发电系统效率优化路径与关键技术突破

于成鑫

华能新能源股份有限公司蒙东分公司 内蒙古 通辽 028000

摘要：在全球能源结构加速向清洁低碳转型的背景下，风力发电作为可再生能源的重要支柱，其系统效率直接关系到能源利用经济性、电网稳定性及“双碳”目标的实现。本文系统梳理了风力发电系统效率的内涵与影响因素，从风资源评估、风机本体设计、控制策略、运维管理及并网技术五个维度构建了效率优化路径体系。在此基础上，重点探讨了大型化与轻量化叶片设计、智能偏航与变桨控制、基于数字孪生的预测性维护、先进电力电子变换器以及人工智能驱动的风电场协同优化等关键技术突破方向。研究表明，多学科交叉融合与智能化升级是提升风电系统全生命周期效率的核心驱动力。未来，需进一步强化基础研究、推动标准体系建设、完善政策激励机制，以实现风电产业高质量发展。

关键词：风力发电；系统效率；优化路径；关键技术；智能控制；数字孪生

引言

全球气候变化严峻、能源安全战略地位提升，发展可再生能源成国际共识。风能作为清洁、可再生且分布广泛的能源，在全球能源转型中至关重要。截至2024年底，全球风电累计装机超1000GW，中国以超400GW居首。但风电产业高速发展下，提升系统整体效率、降低度电成本、增强电力市场竞争力成行业核心问题。风力发电系统效率是涵盖风能捕获到并网传输全过程的综合性能，传统关注点多在机组气动或发电机效率，忽视系统协同优化。风电场选址偏差等问题会削弱整体效能。构建覆盖全链条的效率优化路径、聚焦关键技术突破，对推动风电产业从“规模扩张”向“质量效益”转变意义重大。本文将阐述效率内涵、剖析瓶颈、提出优化路径，论述关键技术突破方向，为行业提供参考。

1 风力发电系统效率的内涵与影响因素

1.1 效率的多维定义

风力发电系统的效率可以从多个层面进行界定：

(1) 风能利用系数(C_p)：这是衡量风轮捕获风能能力的核心指标，由贝茨(Betz)极限理论可知，其理论最大值为59.3%。实际风机的 C_p 值受叶片翼型、攻角、雷诺数等因素影响。(2) 机械传动效率：指风轮旋转动能通过主轴、齿轮箱(或直驱系统)传递至发电机转子的效率。齿轮箱的摩擦损耗、轴承的机械阻力等都会造成能量损失。(3) 发电机效率：将机械能转化为电能的效率，主要取决于电机的设计、材料(如永磁体、铜损、铁损)及运行工况。(4) 变流器效率：在变速恒频风电机组中，电力电子变流器用于调节电压、频率和功率因数，其开关损耗和导通损耗直接影响系统输出效率。

(5) 风电场级效率(或容量因子)：指风电场实际年发电量与其理论最大发电量(装机容量 $\times 8760$ 小时)的比值。该指标综合反映了风资源禀赋、机组可用率、尾流效应、电网限电等多种因素的影响。

1.2 主要影响因素分析

制约风电系统效率的因素错综复杂，主要包括：

(1) 风资源不确定性：风速、风向的随机性和间歇性导致风机无法始终运行在最佳工作点。(2) 尾流效应：上游风机对下游风机造成的风速衰减和湍流增强，可使下游机组发电量减少。(3) 控制策略局限性：传统的定桨距或简单变桨控制难以应对复杂多变的风况，导致能量捕获不充分或载荷过大。(4) 设备老化与故障：叶片腐蚀、齿轮箱磨损、发电机绝缘老化等问题会随运行时间累积，导致性能衰退。(5) 运维响应滞后：事后维修模式无法预防潜在故障，非计划停机时间直接影响发电收益。(6) 并网适应性差：低电压穿越能力不足、谐波污染等问题可能导致电网调度限制风电出力。

2 风力发电系统效率优化路径体系

2.1 精准化风资源评估与微观选址

传统依赖测风塔的方式虽有一定精度，但存在空间覆盖有限、建设周期长、成本高等弊端。现代优化路径强调融合多源异构数据，构建高时空分辨率的风场模型。具体而言，可利用激光雷达(LiDAR)进行远程、灵活的风廓线测量，结合计算流体动力学(CFD)仿真技术，对复杂地形下的三维风场进行精细化重构^[1]。在此基础上，集成高分辨率数值天气预报(NWP)模型的历史与预测数据，形成动态风资源数据库。通过这一综合手段，工程师能够在微观尺度上精确评估每一台风机的最佳安装坐标与

朝向,有效规避地形遮挡与机组间尾流干扰,从而最大化风电场的整体布局效率和年发电量。

2.2 高效风机本体设计与制造

风机本体前的优化路径正朝着大型化、轻量化与高可靠性方向演进。一方面,通过不断增大叶轮直径,风机能够扫掠更大面积的风能,尤其在低风速区域显著提升发电能力;另一方面,为应对由此带来的结构载荷剧增,行业广泛采用碳纤维/玻璃纤维复合材料、拓扑优化设计等先进手段,在保证强度与刚度的同时大幅减轻叶片重量。在气动性能方面,依托高精度CFD模拟与风洞试验,研发适用于不同气候与湍流条件的专用翼型,持续逼近贝茨极限。在传动与发电系统层面,半直驱与全直驱技术因其省去齿轮箱、减少机械损耗而日益普及;同时,高温超导发电机等前沿探索也为未来进一步提升功率密度与效率开辟了新路径。

2.3 智能化运行控制策略

传统控制方法多局限于单机、被动响应,难以兼顾效率与载荷。新一代优化路径则强调主动预测与全局协同。例如,独立变桨控制(IPC)通过对每支叶片实施差异化角度调节,不仅能有效平衡叶轮所受的非对称载荷,延长关键部件寿命,还能在风剪切或偏航误差等非均匀入流条件下提升能量捕获效率。更进一步,尾流导向控制(Wake Steering)通过有意识地微调上游风机的偏航角,引导其尾流偏离下游机组,从而在牺牲少量上游发电量的前提下,换取整个风电场总出力的净增长^[2]。此外,基于模型预测控制(MPC)的方法,利用短期高精度风速预报,提前规划桨距角与发电机转矩的最优轨迹,使风机始终紧贴理论最大功率曲线运行,显著提升动态响应性能。

2.4 数字化智能运维管理

运维管理的优化路径正从传统的“故障后维修”模式,全面转向“预测性维护”范式。其核心在于构建基于数字孪生(Digital Twin)的智能运维体系。该体系通过深度融合SCADA系统、振动传感器、油液分析仪、无人机高清图像等多源异构数据,为每台风机构建一个实时更新的虚拟映射。在此基础上,运用先进的机器学习算法对海量时序数据进行深度挖掘,不仅能精准识别早期故障征兆,还能对关键部件(如主轴承、齿轮箱)的剩余使用寿命进行科学预测。最终,结合天气窗口、备件库存、人力资源等约束条件,系统可自动生成最优维护工单与调度方案,将非计划停机时间降至最低,实现运维成本与发电收益的最佳平衡。

2.5 高效灵活的并网与电网友好性技术

提升风电的“电网友好性”已成为效率优化不可或缺的一环。优化路径要求风电机组不仅要高效发电,更要具备主动支撑电网的能力。这首先体现在电力电子接口的革新上,采用模块化多电平换流器(MMC)等先进拓扑结构,可显著降低开关损耗,提升变流效率与电能质量。其次,虚拟同步机(VSG)技术通过在控制算法中引入模拟同步发电机的惯量与阻尼特性,使风机在电网频率波动时能提供有效的有功支撑,增强系统稳定性。在极端场景下,如弱电网或孤岛运行,构网型(Grid-Forming)控制技术赋予风机自主建立并维持稳定电压与频率的能力,使其从“跟随者”转变为“构建者”,极大地提升了整个电力系统的韧性与恢复能力。

3 关键技术突破方向

3.1 大型化与轻量化叶片设计技术

叶片作为风能捕获的“第一道关口”,其设计正面临前所未有的挑战。随着风机单机容量迈向15兆瓦乃至更高,叶片长度已突破120米,给制造、运输与吊装带来巨大压力。为此,分段式与模块化叶片设计成为重要突破口,它不仅解决了超长叶片的物流难题,还允许对受损局部进行快速更换,从而降低全生命周期维护成本。在材料与结构层面,智能材料的应用展现出广阔前景,例如嵌入形状记忆合金或压电元件,可使叶片在运行中根据风况实现微小的自适应形变,动态优化气动外形。同时,增材制造(3D打印)技术正被探索用于制造具有复杂内部轻质夹芯结构的叶片部件,通过精确控制材料分布,在保证力学性能的同时实现极致轻量化,为效率提升开辟新通道。

3.2 智能偏航与变桨协同控制技术

偏航与变桨系统作为风机的两大执行机构,其协同水平直接决定了整机的运行效能。传统上二者各自为政,难以实现全局最优。智能协同控制技术通过深度融合感知、决策与执行环节,实现了从“单点最优”到“系统最优”的跨越。其中,基于强化学习(RL)的自适应控制方法尤为引人注目,它允许控制系统在与真实风环境的持续交互中自主学习并进化出最优策略,无需依赖精确且复杂的物理模型。在此基础上,多机协同尾流控制将整个风电场视为一个有机整体,利用分布式优化算法,动态协调所有风机的偏航与变桨动作,以全场发电量最大化为目标进行联合决策^[3]。此外,在面对台风、飑线等极端气象事件时,该技术还能启动预设的安全模式,通过主动调整运行状态来抑制极端载荷,有效保护设备安全,体现了效率与安全的统一。

3.3 基于数字孪生的预测性维护技术

数字孪生核心在于构建一个与物理风机实时同步、虚实互动的高保真虚拟模型。关键技术的突破首先体现在建模方法上,即采用物理-数据混合建模范式,将基于第一性原理的机理模型与数据驱动的深度学习模型深度融合,既保留了物理规律的可解释性,又具备了对复杂非线性行为的强大拟合能力。在架构层面,边缘-云协同计算模式成为主流,在风机端部署的边缘计算节点负责实时异常检测与初步诊断,而云端则承担大规模历史数据的训练与模型迭代任务,两者协同工作,确保了系统的实时性与智能性。为了提升现场作业效率,增强现实(AR)与虚拟现实(VR)技术也被引入,专家可远程通过AR眼镜指导现场人员进行精密操作,实现“天涯若比邻”的高效协同,大幅缩短故障处理时间。

3.4 先进电力电子变换与并网技术

作为连接风机与电网的“智能接口”,电力电子技术的每一次进步都直接转化为系统效率的提升。当前最具颠覆性的突破在于宽禁带半导体器件(如碳化硅SiC、氮化镓GaN)的规模化应用。相比传统硅基IGBT, SiC器件拥有更高的开关频率、更低的导通与开关损耗以及更强的耐高温能力,使得新一代变流器的效率可轻松突破98.5%,同时体积与重量也大幅缩减。除了高效能量转换,现代变流器还被赋予了主动治理电网质量问题的能力,能够动态提供无功功率支撑,并利用有源滤波技术抑制自身及外部电网的谐波污染,显著改善电能质量^[4]。更为重要的是,具备黑启动与孤岛运行能力的构网型变流器,使风电场在电网崩溃后能作为可靠的启动电源,自主重建局部电网,这对于提升能源系统的整体韧性具有战略意义。

3.5 人工智能驱动的风电场协同优化平台

一个成熟的AI驱动协同优化平台,能够无缝集成来自气象卫星、地面雷达、风机传感器及电网调度中心的多源异构信息,形成对风电场内外环境的全景感知。在此基础上,利用深度学习模型(如ConvLSTM、图神经网络GNN)进行超短期功率预测,其精度已能达到95%以

上,为电网调度和市场交易提供了坚实的数据基础。平台的核心功能在于动态经济调度,它能在满足电网指令的硬性约束下,通过求解复杂的多目标优化问题,实时分配各风机的出力,巧妙地在发电收益最大化与设备疲劳损伤最小化之间找到最佳平衡点。展望未来,此类平台还将作为虚拟电厂(VPP)的控制中枢,将风电场与光伏、储能等其他分布式资源聚合为一个可调度、可交易的灵活性单元,深度参与电力现货与辅助服务市场,从而全面提升风电资产的经济价值与社会价值。

4 结语

提升风力发电系统效率是复杂系统工程,需打破“单点优化”思维,构建全链条、全要素协同优化生态。本文“五维一体”优化路径为解决效率瓶颈提供清晰框架,关键技术突破正重塑风电产业格局。未来,风电系统效率优化将呈现深度智能化, AI实现自主决策;高度融合化,“源-网-荷-储”一体化成主流;极致绿色化,产业链绿色属性全面强化三大趋势。为加速进程,建议国家加强顶层设计,加大对基础性、颠覆性技术研发支持,完善并网、电力市场等相关标准法规,健全基于性能和效率的激励机制。如此,风力发电才能成为全球能源可持续发展中坚力量,为构建现代能源体系贡献核心动能。

参考文献

- [1]孙佳叶.风力发电系统设计优化与运行效率提升研究[J].中国战略新兴产业,2025,(11):126-128.
- [2]王湜.风力发电系统效率提升技术研究[C]//中国企业文化促进会职业教育专业委员会.数字化背景下建筑企业生产与企业文化融合式发展论坛论文集.内蒙古锡林郭勒盟电投新能源有限公司;,2025:199-201.
- [3]汪灿.风力发电效率提升策略与技术挑战研究[J].电力设备管理,2025,(06):101-103.
- [4]韩金龙.新能源电厂中风力发电效率的评估与提高要点[J].中国战略新兴产业,2025,(27):70-72.