

风力发电机组变频器在电气系统中的应用研究

胡天森

国能（重庆）新能源开发有限公司，重庆 400000

摘要：风能作为一种取之不尽、用之不竭的自然资源，逐渐成为人类重要的能源之一。伴随可再生能源技术的迅猛发展，风力发电已成为现代电力系统里不可或缺的部分，作为风力发电机组的核心电力电子设备，在提升系统效率、保障电网稳定方面意义重大，本文从风力发电系统的基本原理起步研究，详细剖析变频器的技术特性以及其在电气系统里的应用成效，结合技术发展动态与效益评估，为风力发电机组变频器的优化设计与工程应用提供理论上的支撑。

关键词：风力发电；变频器；电力电子技术；系统稳定性；节能减排

DOI: 10.63887/fet.2025.1.2.6

引言

在全球能源转型的当下背景，风力发电技术凭借清洁与可持续特性，成为能源结构调整关键方向，风力资源的波动情况对电网兼容性构成了严峻挑战，而变频器技术借助矢量控制技术，可根据风速的变换及发电机转速，及时调整转子绕组三相电流的频率、幅值、相位、相序^[1]，成为攻克这一问题的核心技术，本文对变频器在风力发电时的作用机制及应用效益做了系统研究，期望为行业技术升级与政策制定给出参考。

一、风力发电技术概述

（一）风力发电系统简介

风力发电是一种基于科学技术的能源转换过程，旨在将风能转化为电能，以满足人们的日常生活用电需求。在风力发电系统中，电气控制技术发挥着至关重要的作用^[2]。风力发电系统的核心原理在于将自然风能转化为机械动能。当气流作用于机组叶片时，带动叶轮组件旋转运动，随后通过传动装置提升转速，最终驱动发电机组实现电磁感应发电。由于风能资源具有间歇性和波动性特征，且风功率与风速三次方成正比，导致系统输出功率会随气流速度的改变产生明显波动。配置先进的电力

电子转换装置，即实现不同形式能量的高效转变，又保证契合电网接入的规范规定，现今主流风电设备一般配置变速恒频运行模式，该技术方案可有效平衡旋转机械转速与电网标准频率之间的关系，在这一流程里，变频调节装置起到的作用显著，依靠实时调节电流频率参数，维持跟公共电网的稳定接通^[3]。

（二）风力发电机组的组成及工作原理

一般的典型风力发电机组主要靠捕获风能的风轮、能量传递机构、发电单元、电能调节模块还有智能化控制系统这五大部分一起运作，当气流推动风轮实现旋转时，其生成的机械动能经齿轮增速机构放大转动速度，随后对发电机的电磁感应部件起作用完成能量转化。处于电力转换阶段时，配置好的交直流复合变换装置可精准调控电能参数，保证输出电力与并网规范要求相符，现阶段行业大量采用的双馈异步发电机和永磁同步发电机两类机型，都凭借电力频率调节装置达成动态转速吻合，采用实时优化能量传输路径办法，有效增进机组在不同工况下的发电效率以及电网适配能力。

二、风力发电机组变频器技术详解

（一）变频器在风力发电系统中的作用

作为风力发电系统核心调节单元的是变频器，依靠多重技术手段有效优化机组运行效能，其借助动态调控发电机转速与电网频率的关联，让两者实现柔性连接，从而扩大风轮针对不同风速段能量捕捉的适应区间，在能量转换开展期间，变频器同步起到无功功率支撑功效，有效抑制电网电压的波动，增强电力传输的平稳性。按照电能质量优化需求，该装置里面安装了多重滤波模块，能精准去除高频电流产生的畸变，保证输出波形与国际通用电能质量标准相符，设备运行期间，变频器采用柔性功率传输机制^[4]，极大地降低齿轮箱等机械部件承受的瞬时负载，降低设备整体的磨损，实际开展运行的数据显示，添加变频调节系统的风电机组，其全年发电效率提升幅度差不多能有 8%至 12%，切实证明了该技术在风能利用率方面的核心价值。

（二）风力发电机组变频器的分类及特点

依照电路拓扑结构的不一样，风力发电机组配套的变频装置，主要分为全功率型以及部分功率型两大类，全功率型变频装置一般是和永磁同步发电机组配合着使用，其显著优势体现为支持发电机在宽频率范围内安稳运行^[5]，同时拥有较强的电网故障穿越本领，但在设备初期投资阶段，有较高的成本压力。部分功率型变频装置大量适配双馈异步发电机系统，以在转子侧设置功率调节单元的方式实现精准控制，如此结构设计让设备体积紧凑起来，还把整体制造成本给降低了，但这种装置的运行性能易受电网电压瞬间下滑等异常工况的波及，值得注意的是，现阶段技术的发展走向聚焦于模块化多电平变流技术，这类创新性的拓扑结构采用多单元级联设计与冗余容错机制，在保持高效能量传输的期间，极大提升了系统面对复杂工况的稳健表现和长期运行的可靠水平。

三、风力发电机组变频器技术的发展与趋势

（一）风力发电技术的发展现状

根据全球风能理事会（GWEC）发布的《全球风能报告》，2024 年全球风电新增装机容量包括 109 吉瓦的陆上风电和 8 吉瓦的海上风电，使全球累计装机容量达到 1136 吉瓦，中国以近 80000 兆瓦的新装机容量领先。处于海上风电规模化开发加上低风速区域精细化利用的行业背景下，相关设备需拥有更宽的电压适配范围以及更强的抵御盐雾侵蚀特性，从技术革新的角度看，大规模运用碳化硅功率器件，推动变频装置运行效率冲破 98%的技术门槛，与传统方案对比，能量损耗差不多降低了三分之一，为高湿度、高腐蚀性等恶劣环境里设备保持长效运行提供了技术后盾。

（二）风力发电机组变频器技术的发展走势

未来技术的演进会围绕三个核心方向展开：首要方面是数字化控制系统的升级，经由融合人工智能技术搭建智能预测性维护架构，做到设备潜在故障的预先预警与精准诊断；另一个发展的侧重点是混合储能系统集成，采用超级电容器跟锂电池的复合储能调节策略，有效消除风电场输出功率的随机波动干扰。为适应远距离海上风电并网这一需求，提升高压直流输电的适配能力成为关键突破点，应针对变频装置的拓扑结构及控制逻辑做针对性优化，值得瞩目的是，国际电工委员会出台的 IEC 61400-21 标准，已将变频器在频率响应、无功调节等方面的电网支撑能力纳入技术规范性指标，这对并网设备动态支撑能力作出强制性的要求。

四、应用效益分析

（一）节能减排效益

从节能减排效益角度，采用先进变频技术的风电场依靠动态调节机组出力，使之与电网

需求实时匹配,把单位发电的二氧化碳排放水平降低至 1.2 至 1.5 吨每兆瓦时,就装机容量 100 兆瓦的典型风电场举个例子,该风电场年度碳减排成果与 6 万公顷森林固碳能力一样。变频器所搭载的无功补偿模块可自动优化电网的无功分布,把输电线路损耗减少大概 5%,而内置的智能谐波抑制功能可进一步降低电能输送过程中的额外损耗,伴随自适应功率控制算法的运用,系统可精准获取低风速区间的风能资源,切实降低弃风率,从而在发电端以及输配端双双提升清洁能源利用率。

(二) 系统稳定性效益

变频技术凭借低电压穿越能力与动态响应机制的协同优化,极大增强风力发电机组对电网扰动的适应本领,当电网电压瞬间降到额定值 15%的极端工况情形时,装载第三代 IGBT 模块的变频器可借助快速功率跟踪算法,在 0.6 秒内自主调整直流母线电压以及无功输出,同时维持机组的并网运转状态,杜绝因电压跌落造成的连锁脱网风险。实测数据说明,采用自适应虚拟同步机技术的变频系统可精准稳定区域电网电压波动率在 $\pm 2\%$ 范围内,其响应速度比传统装置的响应速度提升了 30%以上,新一代变频器借助所集成的频率 - 电压双模态控制策略,能在电网频率偏移的情况下主动调节有功出力,以达到毫秒级的精度参与系统一次调频,进一步增进电力网络的动态稳定性,德国北海某海上风电场把全功率变频器完成升级后,成功把电网故障时段的无功支撑容量提升到额定功率的 120%,为欧洲大陆电网给予关键的惯性支撑作用。

(三) 经济效益分析

风力发电机组变频技术的创新实践,在初期设备采购环节占总成本的 15%至 20%,但它利用最大功率点跟踪算法与自适应变桨协同实施控制,大幅提升低风速范围的能量采集效率,让整体投资回收的时间周期能缩减至 4 到

6 年,以中国西北区域某 200 兆瓦风电场当作例子,采用第三代碳化硅功率器件的变频系统将年发电收益提高 320 万元,还凭借模块化设计与智能故障诊断功能削减运维成本,设备停机开展检修的频次较去年同期下降 40%,进一步的分析说明,变频器内置的预测维护算法可预先识别齿轮箱及发电机潜在异常,防止非计划性的停运引发发电损失,配合电网调度所要求的快速功率响应属性,每年额外增添 7%的边际收益。目前主流厂商已推出全生命周期成本优化方案,通过云端能效管理平台实现设备健康状态与发电策略的动态匹配,确保风电场在全运营周期内维持经济性最优。

五、变频器技术在实际工程中的挑战与协同优化策略

(一) 实际工程应用中的技术挑战

现阶段风力发电系统内变频技术的工程化推广依然有多重技术壁垒要攻破,就环境适应情况这一层面,海上风电场盐雾的侵蚀以及湿热交变环境,向变频设备的热管理效能和绝缘防护发起特殊挑战,亟待依靠三防涂层工艺的升级与复合散热结构的设计提升设备可靠性。就电网交互情况而言,随着新能源并网比例持续上扬,电网对变频装置在低惯量支撑能力与毫秒级频率响应速度方面提出了更苛刻的技术指标,迫切需要开发带有同步发电机特性的智能控制算法,就大功率变频器运行期间产生的宽频域谐波容易造成电网谐振风险而言,有必要结合多电平拓扑架构与实时滤波技术,以实现谐波频谱的动态调控,从成本控制角度看,高功率密度碳化硅功率器件制造成本尚未完全达到市场的平衡水平,必须依靠标准化模块设计及产业链协同创新来创建成本优化路径,就像采用可扩充的功率单元并联办法降低冗余设计带来的额外成本。

(二) 多系统协同优化策略

风电机组性能若要全面提升,需凭借多维

度技术融合与系统性优化,通过储能装置跟变频系统的深度契合,采用超级电容器直接并联直流母线的架构设计,可有效减弱风功率随机波动对电气设备的冲击力度,在降低变频器面临过载情况概率的同时,有效提升电网频率的调节裕量。依托数字孪生框架搭建的智能运维平台,可实时映射变频器的运行状态,同时预测关键部件寿命的衰减走向,通过边缘侧实时数据分析实现故障警报与远程参数调适,把非计划产生的停机概率控制在 2%以内,面对风电行业多源异构设备的互联需求,推动功率模块机械接口及通信规约的标准化落实,设置兼容双馈、直驱等多种机型与不同储能介质的开放型交互平台,可以极大降低系统扩展及升级改造的工程复杂系数,真实实践说明,采用 IEC 61400 - 25 标准协议的风电场群完成技术改造后,设备互联互通的效率上扬了 40%,全生命周期运维的成本降低了 18%。

(三) 工程实践与未来展望

就海上风电特殊工况而言,可择取中国东部典型高盐雾海域风电场开展实证方面的研究,对比传统硅基变频器和碳化硅变频器于腐蚀性环境下的发电效率衰减率及部件故障间隔时间,凭借实际运行数据验证新型材料及防

护工艺的技术经济性,就技术进步层面,应加速人工智能算法同电力电子控制进行交叉融合,好比依托深度神经网络去构建风速时空预测模型,并把该模型嵌入至变频器功率前馈控制回路,完成风轮惯性跟气动载荷的协同改进,进而冲破当前低风速工况的能量转换瓶颈,从行业规范化建设的角度看,建议构建围绕电网动态支撑性能的统一测试评价体系,同时结合碳达峰政策走向设计变频器能效分级补贴机制,用技术标准牵引与市场激励双向驱动,推动风电变流系统往高可靠性、高穿透性方向优化升级。

结束语

处于全球能源转型加速的形势下,风电变频技术的不断改进对构建新型电力系统意义重大,材料革新跟智能算法的深度融合正推动变频装置往高效可靠方向升级,而海上风电环境适应方面的需求与高比例并网需求,对设备性能提出更高要求。未来需通过多维度技术协同优化与标准化体系建设,破解设备可靠性、经济性与电网兼容性之间的平衡难题,同时依托政策引导与市场机制激活技术升级动能,为风电产业的高质量发展注入持续动力,助力“双碳”目标稳步实现。

参考文献

- [1] 冯尔璋. 电气控制技术在风力发电设备中的应用研究[J]. 造纸装备及材料, 2025, 54(02): 112-114.
- [2] 秦玉磊. 风力发电场中的电气可靠性分析与优化研究[J]. 电工技术, 2024, (S1): 384-387.
- [3] 伍卫华, 高飞, 巴恩, 等. 电气控制技术在风力发电系统中的应用[J]. 科技资讯, 2024, 22(06): 80-82.
- [4] 杨金勇, 王海清, 杨小峰. 风力发电机组平台漏电现象分析及处理[J]. 电力安全技术, 2023, 25(05): 24-25.
- [5] 宋春阳. 风力发电机组偏航系统设计、选型和试验研究[D]. 湖南大学, 2018.