

# 海上风电输电与并网关键技术研究

陈跃 朱容光

华电滕州新源热电有限公司，山东滕州，277500；

**摘要：**在全球能源转型背景下，海上风电发展迅猛。本文聚焦海上风电输电与并网关键技术，剖析交流、直流及混合输电技术特点，探讨换流器、海缆等关键装备技术进展，研究有功/无功控制、安全稳定控制及并网系统控制技术，涵盖故障保护与智能控制应用。海上风电并网面临频率、电压及暂态稳定性挑战，通过多种控制策略与技术手段可有效应对。研究成果为提升海上风电利用效率、保障电网安全稳定运行及推动产业规模化发展提供有力支撑。

**关键词：**海上风电；输电技术；并网技术

**DOI：**10.69979/3041-0673.25.07.028

## 引言

在应对气候变化和能源转型的大背景下，海上风电凭借其资源丰富、风速稳定等优势，成为全球能源发展的重要方向。然而，海上风电输电与并网涉及复杂的技术体系，从远距离大容量输电到与电网的可靠连接，每一个环节都面临诸多挑战。研究这些关键技术，对于提升海上风电利用效率、保障电网安全稳定运行、推动海上风电产业规模化发展具有至关重要的意义。

## 1 海上风电输电技术

### 1.1 交流输电技术

交流输电技术以电磁感应定律为基石，借由电流的周期性变化产生交变磁场，进而实现电能的传输。在海上风电场，其系统架构通常呈现为风机出口连接箱式变压器进行初次升压，随后借助交流海底电缆，将电能传输至海上变电站，在此进行二次升压后，最终接入陆地电网。该技术历经长期发展，已然成熟，且设备成本相对较低，在风电场离岸距离较近、规模相对较小的场景中，展现出良好的适用性。然而，交流输电存在电容电流大的固有弊端，这导致线路损耗居高不下，并且极大地限制了输送距离。经实践表明，当传输距离超过 100 km 时，其技术经济性会急剧下降，难以满足远距离、大容量输电的需求。

### 1.2 直流输电技术

直流输电需先在送端换流站将交流电转换为直流电，通过输电线路传输至受电端后，再经逆变为交流电接入电网。与交流输电相比，直流输电不存在电容电流问题，线路损耗显著降低，在远距离、大容量输电场景中

中优势尽显。其中，柔性直流输电（VSC-HVDC）技术采用可关断器件，能对有功和无功功率实现独立精准控制。其典型拓扑结构模块化多电平换流器（MMC），由众多子模块串联构成，凭借精妙的调制策略，达成电压调节与电能质量的优化控制。在一些远海风电项目中，VSC-HVDC 技术的应用大幅提升了电能输送效率，同时增强了电网运行的稳定性。

### 1.3 混合输电技术

混合输电技术有机融合了交流与直流输电的特性，充分发挥交流输电在近距离配电时的灵活性优势，以及直流输电在远距离、大容量输电方面的卓越性能。其系统涵盖交流输电线路、直流输电线路以及换流站等关键部分。在实际运行过程中，可依据电网的实时需求，灵活、动态地调整交直流输电的比例。对于离岸距离适中、风电场规模较大且周边电网结构错综复杂的海上风电场景，混合输电技术能够对输电方案进行优化，有效提升输电的可靠性与经济性，为海上风电输电提供了一种兼具灵活性与高效性的全新选择。

## 2 海上风电并网关键装备技术

### 2.1 换流器技术

传统两电平换流器结构简单，但输出电压谐波含量高。三电平换流器在一定程度上改善了波形质量，降低了开关器件电压应力。模块化多电平换流器（MMC）技术不断发展优化，其通过改进子模块拓扑结构，如采用半桥、全桥等多种形式，提升直流故障处理能力。在均压控制与调制策略研究上，运用电容电压平衡算法和多电平通用空间矢量调制方法，优化输出波形，降低开关

损耗。为适应海上平台空间有限的情况,紧凑型换流器技术探索采用新型材料、集成化设计,以减小体积、重量,提高功率密度。

## 2.2 海缆技术

海底电缆按绝缘材料分为交联聚乙烯绝缘海缆、充油海缆等类型,其结构包含导体、绝缘层、金属护套等部分。交流海缆在传输过程中存在电容电流,限制传输距离;直流海缆无电容电流问题,适合远距离输电。海缆绝缘技术采用高纯度绝缘材料与特殊工艺,确保长期可靠运行。敷设施工方法有直埋、敷设在海床表面等,需根据海底地形、海洋环境选择。海缆故障检测采用时域反射法、行波法等技术定位故障点,修复时需专业海工船进行复杂作业,保障输电链路的稳定性。

## 3 海上风电集群有功/无功控制技术

### 3.1 有功控制技术

风电机组层面,最大功率点跟踪(MPPT)控制通过实时调节叶片桨距角与转速,确保风机在不同风速下都尽可能捕获最大风能并转化为电能输出,显著提升发电效率。桨距角控制则在风速过高时,调整叶片角度以限制风能捕获,防止机组过载损坏,保障设备安全。超速控制在极端风速情况下迅速介入,使风机转速维持在安全阈值内,避免因转速失控引发事故。在集群控制中,这些策略协同运作。例如,根据电网负荷变化及各风电场风速等实际情况,动态调整各风电机组有功出力,优先保障关键区域供电,提升海上风电集群整体对电网有功功率支撑的精准度与可靠性,助力电网稳定运行。

### 3.2 无功控制技术

海上风电运行中,无功控制是维持电压稳定、降低输电损耗的关键环节。静止无功补偿器(SVC)通过晶闸管控制电抗器和电容器组,快速调节无功输出,能有效应对风电场电压波动。当电压降低时,SVC迅速输出感性无功,抬高电压;电压过高时,吸收感性无功,稳定电压水平。静止同步补偿器(STATCOM)基于电压源换流器技术,具备更快响应速度与更强无功调节能力,可灵活实现容性或感性无功输出,显著改善风电场电压稳定性。在海上风电集群中,一方面依据各风电场位置、规模及电网连接情况,合理配置SVC、STATCOM等无功补偿装置,优化无功分布;另一方面,协调风电机组自身无功调节能力,如通过变流器控制实现机组发出或吸收无功,综合降低输电线路无功电流,减少损耗,提升

电网整体电压质量,保障海上风电集群稳定并网运行。

## 4 海上风电安全稳定控制技术

### 4.1 海上风电并网对电网稳定性的影响

海上风电并网后,电力系统稳定性面临多方面挑战。在频率稳定性上,由于风资源间歇性、波动性,海上风电输出功率随机变化,当风电占比较高时,易导致系统频率波动加剧,严重时甚至引发频率失稳。例如,风速骤降使风电出力大幅减少,若电网备用容量不足,无法及时平衡功率缺额,频率将迅速下降。电压稳定性方面,海上风电场与电网连接的输电线路长、电抗大,风电功率波动会引起线路电压大幅波动,且风电机组在低电压穿越期间吸收大量无功,进一步恶化电压水平,可能致使局部电压崩溃。暂态稳定性上,电网故障时,海上风电与系统间复杂的功率交互及风机自身故障穿越特性,会影响系统暂态功角稳定,如故障清除不及时,风机可能因失步而脱网,威胁电网安全运行。

### 4.2 安全稳定控制策略与措施

#### 4.2.1 频率稳定控制策略

针对海上风电并网的频率稳定问题,虚拟惯性控制策略通过模拟传统同步发电机惯性响应特性,使风电机组在频率变化时快速调整有功输出。当系统频率下降,风电机组释放储存的动能,增加有功功率注入电网,抑制频率跌落;频率上升时,吸收过剩功率,稳定频率。频率下垂控制则依据频率偏差按一定下垂系数调节风电机组有功出力,频率降低,风电机组增加出力,反之则减少出力。实际应用中,通过对大量风电机组进行参数优化与协调控制,如设置合理下垂系数,结合虚拟惯性控制形成复合控制策略,并利用智能算法实时调整控制参数,能有效提升电力系统频率稳定性,增强系统应对海上风电功率波动的能力。

#### 4.2.2 电压稳定控制措施

海上风电电压稳定控制依靠多种措施协同保障。无功补偿是基础手段,在风电场升压站及关键输电节点配置静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)等设备,根据电压监测数据实时调节无功输出,维持电压稳定。变压器分接头调节通过改变变压器变比,调整电压幅值,适应不同运行工况下电压需求。风电机组低电压穿越控制要求风机在电网电压跌落时,不脱网并向电网提供无功支持,帮助恢复电压。例如,在某海上风电场,通过优化无功补偿设备布局与参数设置,结合变

压器分接头的自动调节以及对风电机组低电压穿越能力的强化,成功解决了电压波动频繁问题,确保风电场在不同运行状态下都能维持稳定电压水平,保障电力可靠送出。

#### 4.2.3 暂态稳定控制技术

海上风电并网系统暂态稳定控制技术旨在应对电网突发故障时保障系统安全。快速继电保护利用先进传感与通信技术,快速检测故障并迅速切断故障线路,减少故障对系统冲击。故障穿越控制使风电机组在故障期间保持运行并遵循特定控制策略,如向电网注入适量无功、调整有功输出,避免风机脱网。紧急功率控制在系统暂态稳定受威胁时,快速调节风电场有功功率,如切除部分非关键风电机组或降低其出力,保障系统功角稳定。通过建立完善的故障监测与控制系统,结合仿真分析优化控制策略,在实际工程中,这些暂态稳定控制技术能有效提升海上风电并网系统应对故障能力,降低系统失稳风险,保障电力系统安全可靠运行。

### 5 海上风电并网系统控制技术

#### 5.1 故障保护技术

海上风电系统运行环境复杂,故障类型多样,涵盖交流侧短路、直流侧短路以及风机故障等。故障保护技术旨在迅速、准确地应对各类故障,保障系统安全。直流故障穿越技术通过优化换流器控制策略,如采用虚拟同步机控制,使系统在直流故障时仍能维持稳定运行,避免脱网事故。交流侧故障保护运用差动保护、距离保护等原理,快速识别并切除故障线路,限制故障影响范围。系统恢复策略则在故障排除后,通过自动重合闸、备用电源切换等手段,实现风机快速重启与功率传输恢复,最大程度缩短停电时间,确保海上风电系统可靠运行,维护电网的安全稳定。

#### 5.2 智能控制技术应用

智能控制技术在海上风电并网系统中展现出巨大潜力。基于人工智能的控制方法,如神经网络、模糊控制等,能够深度学习风电场复杂多变的运行工况,精准优化风机运行参数,有效提升发电效率。大数据分析整合设备运行数据、气象数据等海量信息,通过数据挖掘与分析,预测设备潜在故障,合理制定维护计划,降低运维成本。分布式能源管理系统的应用,实现了海上风电场与其他分布式电源、储能系统的协同运作,依据电网实时需求,优化能源分配,提高能源利用效率,全方

位提升海上风电系统的智能化水平,增强系统稳定性与经济性,推动海上风电产业迈向智能化发展新阶段。

### 6 结语

海上风电输电与并网关键技术的发展,是推动海上风电产业迈向新阶段的核心动力。通过对各类输电技术、关键装备技术及系统控制技术的深入研究与实践,已取得显著进展,但仍面临诸多挑战。未来需持续加大研发投入,加强产学研合作,不断优化技术方案,提升海上风电输电与并网的可靠性、高效性,为实现能源绿色转型和可持续发展提供坚实支撑。

#### 参考文献

- [1] 邱世民. 大规模海上风电直流并网系统拓扑与控制策略研究[D]. 华中科技大学, 2023.
- [2] 余浩, 张哲萌, 彭穗, 张志强, 任万鑫, 黎灿兵. 海上风电经柔性直流并网技术标准对比分析[J]. 上海交通大学学报, 2022, 56(04): 403-412.
- [3] 彭穗, 余浩, 许亮, 汤兰西, 王雅婷, 陈俊杰, 苏辛一. 海上风电场输电方式研究[J]. 电力勘测设计, 2021, (1): 68-75.
- [4] 蔡旭, 杨仁炘, 周剑桥, 方梓熙, 杨明扬, 史先强, 陈晴. 海上风电直流送出与并网技术综述[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 2-22.
- [5] 姚伟, 熊永新, 姚雅涵, 李勇, 辛焕海, 文劲宇. 海上风电柔直并网系统调频控制综述[J]. 高电压技术, 2021, 47(10): 3397-3413.
- [6] 张占奎, 石文辉, 屈姬贤, 白宏. 大规模海上风电并网送出策略研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(04): 182-190.
- [7] 汪军. 海上风电 MMC-HVDC 并网系统的直流故障特性分析与控制策略研究[D]. 重庆大学, 2021.
- [8] 刘卫东, 李奇南, 王轩, 张帆, 李兰芳, 燕翥. 大规模海上风电柔性直流输电技术应用现状和展望[J]. 中国电力, 2020, 53(07): 55-71.
- [9] 邹璐. 风电新能源的发展现状及其并网技术的发展前景研究[J]. 无线互联科技, 2019, 16(17): 130-131.
- [10] 闫健. 海上风电并网调度管理模式研究[D]. 哈尔滨理工大学, 2019.
- [11] 高垚. 海上风电输电与并网关键技术研究[J]. 河南科技, 2018, (19): 139-140.