

# 海上输配电系统优化策略研究

伍宏明 耿鑫 邵朋悦 郭伟 崔墨昌  
海洋石油工程股份有限公司 天津 300451

**摘要:**海上输配电系统是海上能源传输分配关键环节,在深海能源开发中作用凸显,但存在设备耐久性欠佳、传输损耗偏高、动态响应能力薄弱等问题。本文提出优化策略,涵盖设备可靠性提升、传输效率优化、智能运维等关键技术,以及规划布局、协同控制策略,包括路径规划、拓扑结构优化、源-网-荷协同控制等,以提升系统性能,保障稳定运行。

**关键词:**海上输配电系统;优化策略;设备可靠性;传输效率;协同控制

引言:随着海上能源开发规模扩大,海上输配电系统重要性日益凸显。作为海上能源传输分配关键,连接发电与用电环节,支撑海洋能源产业发展。但海上环境复杂,系统在运行中面临技术、规划、运维等多方面问题,影响能源传输效率与稳定性。研究海上输配电系统优化策略,对提升系统性能、保障海上能源安全供应、推动海洋经济可持续发展意义重大。

## 1 海上输配电系统现状分析

### 1.1 系统组成与运行特点

海上输配电系统是海上能源传输分配关键环节,由海上变电站、输电线路、电缆及动态补偿装置等核心设备构建。海上变电站如系统中枢,承担电压变换与电能调配,将发电设施高电压电能转化为适宜电压等级,保障稳定供应<sup>[1]</sup>。输电线路像系统脉络,连接海上变电站与用电设备或陆地电网,实现长距离输电。电缆作为重要部分,特殊设计确保海洋环境电能传输安全。动态补偿装置依系统状态灵活调整无功功率,提升功率因数与稳定性。海上输配电系统与陆地差异显著。布局上,海上受海洋地理和设施分布影响,更为分散复杂,需综合考量发电用电设施位置及海洋航道、渔业资源等。陆地布局相对集中,依城市规划等规划。维护方面,海上长期受侵蚀,维护难度大、工作量大,且受天气海况限制,窗口期短暂。环境适应性上,海上设备抗腐蚀等能力要求更高,陆地相对较低。

### 1.2 现存问题与挑战

技术层面,设备耐久性欠佳,长期处于恶劣海洋环境,设备易老化损坏,影响正常运行。传输损耗偏高,海上输电距离长,加上电缆电阻等因素,电能传输中能量损耗较大,降低能源利用效率。动态响应能力薄弱,面对负荷突变、故障等情况,系统难以快速调整,影响供电可靠性与稳定性。规划层面,路径选择受限,要避开海

洋保护区、渔业资源丰富区等敏感区域,可选路径有限。扩容难度不小,海上空间有限,增加设备或线路容量受诸多因素制约。与海洋空间利用存在冲突,系统建设与海洋渔业、航运、旅游等产业开发存在矛盾。运维层面,检修窗口期短暂,海上作业受天气海况影响大。故障定位困难,系统覆盖范围广、设备分散。应急响应效率不高,海上交通不便、救援资源有限。

## 2 海上输配电系统优化关键技术

### 2.1 设备可靠性提升技术

海上环境复杂恶劣,对输配电设备可靠性要求极高。耐腐蚀材料与防护涂层研发是提升设备可靠性的重要举措。海洋中盐分高、湿度大,还有各类腐蚀性物质,传统材料易被侵蚀,导致设备性能下降、寿命缩短。研发新型耐腐蚀材料,如具备高抗盐雾、抗化学腐蚀特性的合金,能增强设备抵御腐蚀的能力。同时,开发高效防护涂层,像纳米涂层可在设备表面形成致密保护膜,有效隔绝腐蚀介质,大幅延长设备使用寿命。模块化与标准化设备设计为设备维护带来便利。将设备设计成多个标准模块,每个模块功能独立且接口统一。当某个模块出现故障,无需对整个设备拆解维修,只需快速更换故障模块,就能让设备恢复正常运行。这不仅缩短了维修时间,减少停电损失,还降低了维修成本,提升系统可用性。智能监测传感器集成实现了对设备状态的实时感知<sup>[2]</sup>。在设备关键部位集成温度、应力、绝缘状态等传感器,能实时采集设备运行数据。通过对这些数据进行分析,可及时发现潜在故障隐患。比如温度异常升高可能预示设备过载或散热不良,应力变化可能暗示设备结构松动或损坏,绝缘状态异常可能引发短路。提前发现并处理这些问题,能有效避免故障发生,保障设备可靠运行。

### 2.2 传输效率优化技术

传输效率优化是海上输配电系统发展的关键。高压

直流输电技术应用优势明显。与交流输电相比,长距离输电时高压直流输电能降低电能损耗,减少线路走廊占地面积,降低输电成本。采用先进换流技术实现交流与直流电高效转换,使其在海上输配电中广泛应用,提升能源传输效率。动态无功补偿与电压稳定控制策略对维持系统稳定运行至关重要。海上输配电系统负荷动态变化和故障冲击易导致电压波动和无功功率不平衡。实施动态无功补偿,根据系统实时需求调整无功功率输出,能稳定系统电压,提高供电质量。采用先进电压稳定控制策略,结合智能算法和实时监测数据,可精准控制系统电压,确保各种工况下系统稳定运行。多端柔性直流输电系统拓扑优化提升了系统灵活性与可靠性。该系统能实现多个电源点和负荷点灵活连接与功率交换。优化系统拓扑结构,合理布局换流站和输电线路,可提高功率传输能力和冗余度,增强系统应对故障和负荷变化的能力,实现更高效可靠电能传输。

### 2.3 智能运维技术

智能运维技术推动海上输配电系统运维管理变革。基于大数据的故障预测与健康管理等能提前发现设备故障隐患。收集设备历史运行、实时监测及环境等多源信息,利用大数据分析和机器学习算法建立故障预测模型,评估设备健康状态,提前制定维护计划,实现从被动维修到主动预防转变,降低设备故障率。无人机与机器人协同巡检技术解决了海上巡检难题。海上环境恶劣,人工巡检难度大、效率低且存在安全风险。无人机飞行灵活、视野广,能快速对大面积海域设备巡检,发现外观缺陷和异常。机器人可在复杂环境下精细操作,进入设备内部详细检查和简单维修。二者协同作业,提高巡检效率和准确性,降低劳动强度和安全风险。数字孪生技术在系统仿真与决策支持中发挥重要作用。建立海上输配电系统数字孪生模型,将实际系统物理特性、运行数据等信息映射到虚拟模型。利用虚拟模型进行各种工况仿真分析,预测系统运行状态和性能指标,为系统规划、设计、运维等决策提供科学依据,实现系统优化运行和智能化管理。

## 3 海上输配电系统规划与布局优化

### 3.1 路径规划方法

海上输配电系统路径规划需综合考量多方面因素。多目标优化模型是关键手段,在规划过程中,不能仅关注单一指标,而要对成本、损耗以及环境影响进行综合权衡。成本方面,涵盖线路建设成本、设备采购成本以及后期维护成本等。损耗则包括电能在线路传输过程中的能量损失,这直接关系到能源利用效率。环境影响涉及对海洋生态、海洋景观等多方面的影响程度。通过构建

多目标优化模型,运用先进的算法和数学方法,寻找在成本、损耗和环境影响之间达到相对平衡的最优路径方案,确保路径规划既经济合理又环保可持续。海洋空间冲突规避策略是路径规划中不可忽视的环节<sup>[9]</sup>。海上空间资源有限,输配电线路路径需与航运、渔业以及生态保护区等协调共存。与航运方面,要避免繁忙航道,避免线路对船舶航行造成阻碍,同时也要防止船舶活动对线路造成破坏。对于渔业活动区域,要充分考虑到渔民作业范围和习惯,尽量减少对渔业生产的影响。在生态保护区,要严格遵循相关保护规定,确保线路规划不会对保护区内的生态环境和生物多样性造成破坏。通过制定科学合理的冲突规避策略,实现海上输配电系统与海洋其他活动的和谐共生。

### 3.2 拓扑结构优化

环形网络与辐射状网络各有特点,对比分析二者有助于选择更适合海上输配电系统的拓扑结构。环形网络具有较高的可靠性,当某一条线路出现故障时,电能可以通过其他路径继续传输,减少停电范围和时间。但环形网络建设成本相对较高,线路布局较为复杂。辐射状网络结构简单,建设成本较低,不过可靠性相对较差,一旦主干线路出现故障,可能导致大面积停电。通过详细对比分析两种拓扑结构的优缺点,结合海上输配电系统的实际需求和运行环境,选择或优化出更合适的拓扑结构。分层分布式架构设计能够提升系统冗余与扩展性。将海上输配电系统划分为不同的层次,每个层次承担不同的功能,通过分布式的方式布置设备和线路。这种架构设计使得系统在局部出现故障时,不会影响其他部分的正常运行,提高了系统的冗余度。同时,分层分布式架构便于系统的扩展,当未来负荷增长或需要增加新的功能时,可以在相应层次进行灵活扩展,满足系统发展的需求。

### 3.3 动态扩容策略

预留容量与弹性设计原则是动态扩容的基础。在系统规划和建设初期,要充分考虑未来负荷增长的可能性,预留一定的容量空间。弹性设计则要求系统具有一定的灵活性和适应性,能够根据实际负荷变化情况及时调整和扩展。通过预留容量和弹性设计,避免系统在短期内因负荷增长而频繁进行大规模改造,降低系统升级成本和风险。模块化设备组合方案为适应未来负荷增长需求提供了有效途径。将输配电设备设计成标准化的模块,每个模块具有独立的功能和接口。当负荷增长时,只需根据需求增加相应的模块,即可快速实现系统扩容。模块化设备组合方案不仅提高了系统扩容的效率,还降低

了扩容成本,同时便于设备的维护和更换,提升了系统的整体性能和可靠性。

#### 4 海上输配电系统协同控制策略

##### 4.1 源-网-荷协同控制

海上风电场作为重要的电源,与输配电系统的功率匹配机制至关重要。海上风电受风速等自然因素影响,输出功率具有波动性和不确定性。要实现与输配电系统的良好匹配,需建立精准的功率预测模型,提前掌握风电场的功率输出情况<sup>[4]</sup>。依据预测结果,输配电系统调整运行方式,如调整变压器分接头、改变线路传输功率等,确保风电场发出的电能能够稳定、高效地接入电网并输送至负荷中心。同时,通过实时监测风电场功率和电网运行状态,动态调整功率匹配策略,以应对风电功率的实时变化。需求侧响应技术是源-网-荷协同控制的重要环节。储能装置在需求侧响应中发挥着关键作用,当风电功率过剩时,储能装置储存多余电能;当风电功率不足时,储能装置释放电能,补充电网供电缺口。可中断负荷调度也是一种有效的需求侧响应手段,通过与用户签订协议,在电网供电紧张时,对部分非关键负荷进行中断或降低用电功率,以保障电网的稳定运行。通过合理调度储能装置和可中断负荷,能够平衡电源与负荷之间的供需关系,提高电网的灵活性和可靠性。

##### 4.2 多能互补集成优化

海上风电、光伏、波浪能等多种能源联合输电策略能够实现能源的互补利用。海上风电和光伏发电受自然条件影响,具有间歇性和波动性,而波浪能相对较为稳定。将三种能源联合输电,可充分发挥各自优势,弥补彼此不足。通过建设多能互补的发电平台,将不同能源产生的电能进行集中整合和优化调配,根据能源输出特性和电网需求,合理安排各种能源的发电功率,提高能源利用效率和供电稳定性。跨区域能源互联与互补调度框架有助于实现更大范围的能源优化配置。不同区域的能源资源分布和负荷需求存在差异,通过建立跨区域能源互联网络,将海上丰富的清洁能源输送至能源需求旺盛的地区。同时,制定统一的互补调度框架,协调不同

区域之间的能源传输和分配,实现能源的跨区域互补和优化利用,提升整个能源系统的运行效率和可靠性。

##### 4.3 应急控制与灾变恢复

极端天气对海上输配电系统构成严重威胁,增强系统韧性是应对极端天气的关键措施。加强输电线路和设备的抗灾设计,提高其抵御台风、海浪、海冰等极端天气的能力。例如,采用加固杆塔、增加线路绝缘强度等措施,减少极端天气对线路和设备的损坏。同时,建立完善的应急预警机制,提前发布极端天气预警信息,做好应急准备工作<sup>[5]</sup>。快速隔离与自愈控制技术能够减少停电范围与时间。当系统发生故障时,快速隔离技术能够迅速定位故障点,并将故障部分与正常部分隔离,防止故障扩大。自愈控制技术则能够在故障隔离后,自动调整系统运行方式,恢复非故障区域的供电,实现系统的自我修复。通过应用快速隔离与自愈控制技术,提高海上输配电系统在灾变情况下的应急响应能力和恢复能力,保障电网的可靠运行。

#### 结束语

海上输配电系统优化是一个涉及多技术、多目标的复杂系统工程。通过应用耐腐蚀材料、高压直流输电与智能运维等技术,可有效提升系统性能。科学的路径规划、拓扑优化与协同控制策略是保障系统长期稳定运行的关键。未来需持续推动技术创新与系统集成,以支撑大规模海上能源的高效开发利用。

#### 参考文献

- [1]张裕,李庆生,罗宁.面向低碳经济目标的输配电系统协同电网扩展规划[J].高压电器,2025,61(05):247-257.
- [2]张晓澍,瞿卫华,谢强.基于深度学习的输配电数据异常检测与智能诊断研究[J].电力设备管理,2025,(06):200-202.
- [3]吕守国.输配电系统电力设计优化与智能电网技术应用研究[J].张江科技评论,2025,(02):45-47.
- [4]王艳丽.智能电网背景下输配电管理模式的创新研究[J].电力科学与工程,2022(10):23-27.
- [5]王春林.基于智能电网的输配电系统优化调度策略研究[J].模型世界,2024(31):80-82.