

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2025.05.001

# 大规模海上风电并网与运行技术综述

朱继忠, 高美云, 肖鹏飞, 董瀚江, 朱浩昊, 林凯欣

(华南理工大学电力学院, 广东广州 510641)

**摘要:**在我国“碳达峰、碳中和”战略目标和构建新型电力系统与新型能源体系的背景下,海上风电已成为可再生能源发展的重要方向。现有工作通过开展海上风电的电力集群技术、并网运行方法等研究,实现海上风电产业的稳定健康发展。文中主要对海上风电能源系统的并网运行优化调度研究展开全面综述。首先,围绕大规模海上风电集群的时空特性、汇集方式、并网技术和送出控制策略展开分析,探讨其在新型能源系统中的运行机制与评估标准,并结合典型工程案例进行分析;然后,全面回顾面向海上风电并网运行的优化调度研究现状,重点聚焦于含海上风电的能源系统组成、调度问题及优化方法;最后,展望海上风电在新型能源系统中并网与运行的发展趋势及亟须深入研究的关键技术方向,为后续相关研究提供参考,推动海上风电高质量发展。

**关键词:**海上风电;可再生能源;新型能源系统;集群特性;并网运行;优化调度

**中图分类号:** TM715

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2025)05-0002-23

## 0 引言

近年来,我国陆续提出了“碳达峰、碳中和”和构建新型电力系统的战略目标,并相继发布了一系列相关政策文件。2021年10月,国务院印发的《2030年前碳达峰行动方案》明确提出,大力发展可再生能源是能源低碳转型的重要任务,要求加快风电、光伏等可再生能源基地的建设,坚持海陆统筹,推动海上风电快速发展<sup>[1-2]</sup>。作为清洁能源的重要组成部分,海上风电依托储能、柔性输电与智能调度等关键技术,为实现高比例可再生能源消纳和能源结构低碳化提供了重要支撑。

随着陆上优质风能资源日渐减少,全球风电开发逐步向海上转移。海上风电拥有更高的风速和更稳定的风场条件,能够实现更高的发电效率和大规模的电力输送。与陆上风电相比,海上风电还具备靠近负荷中心、单机容量大、建设潜力丰富等优势,是未来清洁能源体系的重要支撑。大力发展海上风电将有效减少对化石燃料的依赖,助力我国能源的可持续发展。

海上风电不仅是我国绿色产业的重要支撑,还具有技术含量高、产业链长、带动效应强等特点<sup>[3-5]</sup>。海上风电能够与海水制氢、油气开采、海上交通、海洋牧场等产业深度融合,对战略性新兴产业的集群化发展具有显著推动作用。在传统方式下,海洋的能源消费及其供给是互不连通的,海洋产业之间也互相割裂。发展以海上风电为纽带的产业衔接,

实现能源供需的灵活互动以及油气通道等基础设施的复合利用,对于产能融合具有极其重要的意义。

研究海上风电并网运行,有助于促进海上风电产业的稳定发展。海上风电作为清洁能源的重要组成部分,具有巨大的发展潜力<sup>[6-7]</sup>。通过研究海上风电并网运行状况,可以深入了解其与电力系统的融合效果,优化风电并网运行策略,提高风电发电效率和稳定性,从而推动海上风电产业的可持续发展<sup>[8]</sup>。此外,研究海上风电并网运行技术可以探索更加高效、灵活的风电并网运行方式,提升清洁能源的消纳能力,增加海上风电在电力系统中的比重。最后,研究海上风电评估标准有助于全面评估风电系统的安全性、稳定性与经济性,为海上风电规划、建设与运维提供科学的决策依据。

海上风电并网运行涉及许多关键技术,包括海上风电场与陆上电力系统之间的输电技术、可再生能源的高效消纳技术、在变化的风速和海况下的稳定运行技术、气象预测技术、海上风电发电预测技术以及海上风电并网运行优化调度技术等。文中主要对海上风电并网运行的优化调度技术展开综述,尽管此领域已取得一定进展,但仍面临诸多挑战,需要进一步研究和完善。

为此,文中以大规模海上风电并网与运行技术为主题进行综述,重点探讨海上风电并网方案、关键技术及优化调度方法的研究进展,为工程实践提供参考,并展望未来发展趋势。

## 1 含大规模海上风电的新型能源系统

### 1.1 大规模海上风电集群运行

#### 1.1.1 大规模海上风电集群时空特性

大规模海上风电场通常由数十台至数百台风

收稿日期: 2025-07-05; 修回日期: 2025-09-17

基金项目: 广东省基础与应用基础研究基金资助项目(2022B1515 250006)

力发电机组构成, 这些机组分布在不同海域位置, 形成海上风电集群。相邻风电场受相似的气象条件和地理环境影响, 其出力表现出明显的时序相关性, 且各机组间的功率输出变化趋势有较强的一致性和较弱的互补性。在面向海上风电的时空不确定性研究中, 通常需要先分析多风电场之间的空间相关性, 再研究单风电场内部的时序相关性, 最终构建统一的时空不确定性模型。基于这一思路, 可形成完整的海上风电不确定性量化研究框架, 如图 1 所示。

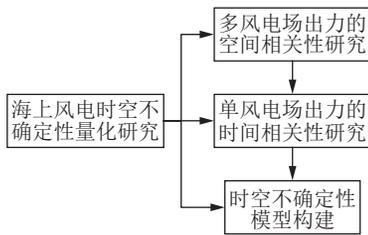


图 1 海上风电时空不确定性量化研究框架

Fig.1 Quantitative research framework on the spatiotemporal uncertainty of offshore wind power

考虑风电的空间相关性, 可以使日前、日内实时调度计划模型更切合实际, 从而更好地进行调度优化, 提高系统运行的经济性和可靠性<sup>[9]</sup>。当前, 风电场的空间相关性主要采用基于相关系数矩阵和 Copula 函数的相关性分析方法, 时序上的自相关性一般采用概率密度函数法、时间序列法和马尔科夫链模型进行分析<sup>[10]</sup>。鉴于任何单一 Copula 函数均不能表现非对称的尾部相关性, 难以精确刻画类型多样的风电场相关性模型, 文献<sup>[10]</sup>采用不同权重的混合 Copula 函数进行建模。海洋多风力发电系统的总体出力分布特征和波动性与各个风力场的风速密切相关。增大风电场群的空间分布规模, 不仅平滑了总输出功率的波动, 也使得最大输出功率随装机容量的增长呈现平滑效应<sup>[11-14]</sup>。

### 1.1.2 大规模海上风电集群汇集方式

海上风电汇集方式主要分为交流和直流两类, 系统通常由海底电缆、开关设备和海上升压变电站组成, 其设计目标是在保证供电可靠性的前提下尽可能降低投资和运行成本<sup>[15]</sup>。

海上交流汇集系统的常见拓扑包括放射式、星形、单环、双环以及混合环。放射式结构线路自升压站向外辐射, 投资成本低, 但单点故障会导致大面积停电; 星形结构将各支路集中接入中央母线, 扩展性好, 适用于中等容量风电场; 环形及混合环结构能够通过多路径供电显著提升可靠性, 但需要投入更多的海缆费用。近年来, 学者们围绕交流集电系统的拓扑优化开展了大量研究, 主要目标是在全寿命周期内兼顾经济性与可靠性。例如, 有研究

基于遗传算法、模糊聚类与图论方法改进拓扑, 提高计算效率和系统鲁棒性; 也有研究提出强化学习和混合整数规划框架, 在满足“N-1”准则的同时优化电缆布局。这些工作表明, 交流集电网络的优化设计已得到充分关注, 并为大规模海上风电并网运行奠定了重要基础<sup>[16-20]</sup>。

相比之下, 直流汇集系统的研究相对较少, 典型形式包括并联型、串并联型和矩阵型。并联型结构控制较为简单, 但母线故障影响范围大; 串并联型结构能够兼顾电压等级和线路损耗, 适用于大容量分区送出场景; 矩阵型结构具有较强的灵活性, 但在控制与保护方面仍存在较大挑战<sup>[21]</sup>。

综上, 海上风电集群汇集方式可归纳为交流并联式、直流并联式和直流串联式 3 类, 其基本示意如图 2 所示<sup>[22-24]</sup>。

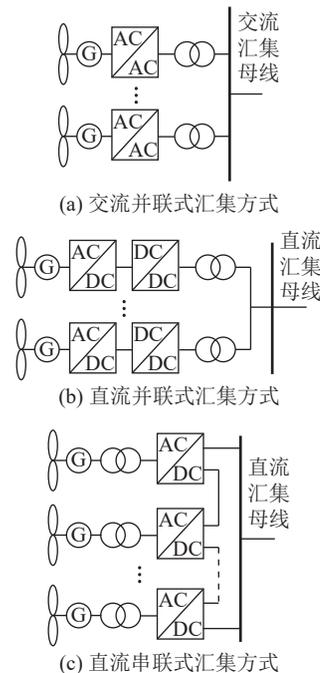


图 2 海上风电集群汇集方式示意

Fig.2 Schematic diagram of collection methods for offshore wind power clusters

### 1.1.3 大规模海上风电集群并网技术

随着海上风电装机规模的持续扩大和离岸距离的不断增加, 风电集群的并网方式正面临新的挑战: 工频交流输电在长距离、大容量条件下存在电缆电容效应加剧、传输距离受限的问题; 高压直流输电虽能有效降低损耗、提升远距离送电能力, 但投资成本较高, 且不同换流器技术各有局限; 低频交流输电可兼顾一定的距离和成本优势, 我国已在江浙地区建设对应示范工程, 但整体仍处于发展完善阶段。3 种不同类型的海上风电并网方式对比见表 1。

表 1 海上风电并网方式

Table 1 Grid integration modes of offshore wind power

并网方式	子类拓扑	优点	缺点	适用场景	典型案例
工频交流并网	单回HVAC/双回HVAC	技术成熟、成本低	距离受限、需无功补偿	适用于 $\leq 80$ km、近海中小容量项目	山东半岛近海
高压直流并网	VSC-HVDC/LCC-HVDC/DRU-HVDC	远距离、大容量、稳定性好	投资高、运维复杂	适用于 $\geq 180$ km、远海大容量项目	英国Hornsea、福建平潭
低频交流并网	单端LFAC/双端LFAC	延长交流传输距离、降低感抗	技术不成熟、需变频	适用于80~180 km、中等容量项目	日本北海道LFAC示范

注: HVDC为高压直流输电; LFAC为低频交流输电技术; VSC-HVDC为电压源换流器型高压直流输电; LCC-HVDC为线路换流器型高压直流输电; DRU-HVDC为二极管整流单元型高压直流输电。

(1) 工频交流并网。工频交流并网是目前应用最为广泛的并网方式, 通过工频(50 Hz)交流电缆将海上风电场接入陆上电网, 适用于近海的中小容量项目。HVAC 系统结构简单、近距离输电成本低、技术成熟、工程经验多; 但其长距离送电成本高, 且受海缆电容充电功率影响, 存在传输容量受限并易出现过电压的问题, 如图 3 所示<sup>[18,25-26]</sup>。

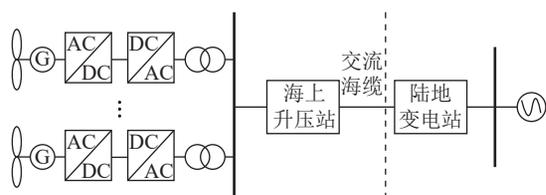


图 3 基于 HVAC 的海上风电集群并网示意

Fig.3 Schematic diagram of off shore wind power cluster grid integration based on HVAC

(2) 高压直流并网。对于远海和大容量海上风电的并网送出, 交流和直流输电方式各有适用范围: HVAC 结构成熟, 适用于近海、中等容量的风电场, 但在输电距离超出 50~80 km 时会受到电容效应和损耗限制。相比之下, 高压直流输电 (high voltage direct current, HVDC) 更适合远距离和大规模送出, 能够有效降低线路损耗并提高传输效率<sup>[27]</sup>。在不同类型的直流方案中, VSC-HVDC 具有有功、无功独立控制能力, 适用于弱电网接入, 并支持黑启动, 其结构如图 4 所示; 二极管整流单元型高压直流输电 (diode rectifier unit based high voltage direct current, DRU-HVDC) 则以结构简单、投资较低为特点, 但需要海上交流电网提供电压支撑<sup>[28-29]</sup>, 其结构如图 5 所示。传统的 LCC-HVDC 虽然在陆地超高压输电工程中广泛应用, 但由于依赖强电网支撑和经济性不足, 目前尚未在海上风电送出工程中采用, 因此文中不再赘述。

(3) 低频交流并网。低频交流并网通过采用低于工频的输电频率(如 16.7、20、25 Hz), 显著降低线路感抗和海缆电容效应, 从而延长交流输电距离

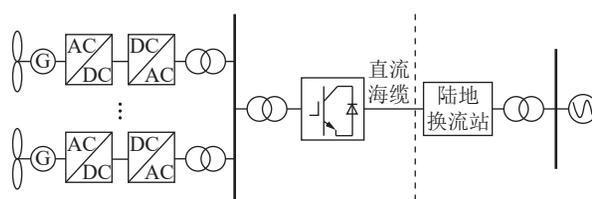


图 4 基于 VSC-HVDC 的海上风电集群并网示意

Fig.4 Schematic diagram of off shore wind power cluster grid integration based on VSC-HVDC

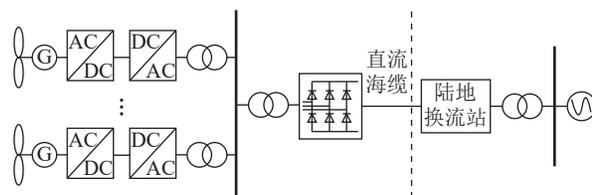


图 5 基于 DRU-HVDC 的海上风电集群并网示意

Fig.5 Schematic diagram of offshore wind power cluster grid integration based on DRU-HVDC

并提高经济性。相比工频海上风电系统, 较低的频率使得电缆的充电功率更小, 电缆的传输能力可显著提升, 同时由于集肤效应和邻近效应的减弱, 低频电缆的功率损耗更小<sup>[30-31]</sup>, 其结构如图 6 所示。分频输电送出技术具有有效负荷能力, 极大地增加了电力输送距离; 无须建造海上换流站, 大大减少了建设费用和维修费用。同时, 该方式在便于海上电网建设方面具有优势, 国内已具备初步工程应用条件, 但相关技术仍需在规模化和长期运行中进一步发展完善。

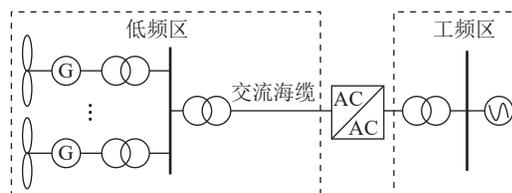


图 6 基于低频交流的海上风电集群并网示意

Fig.6 Schematic diagram of offshore wind power cluster grid integration based on low-frequency alternating current

#### 1.1.4 海上风电并网送出控制策略

海上风电送出系统在运行过程中面临多种挑

战,包括风速波动引起的功率不稳定、远距离输电导致的电压波动以及系统故障下的稳定性问题。为确保海上风电安全、稳定、经济地并入电网,需要制定多层次、多目标的送出控制策略。根据控制目标的不同,这些策略主要包括电压与无功控制、功率平衡与波动抑制、故障穿越与保护协调、频率支撑与系统稳定、调度优化与辅助服务。

首先,在电压与无功控制方面,送出系统需要在风电功率波动和电缆电容效应影响下维持电压稳定。交流系统通常依赖并联电容器组、静止无功补偿器等设备进行动态调节;基于电压源换流器的直流输电系统则能够实现有功与无功的独立控制,特别适用于弱电网接入;而基于二极管换流单元的直流系统需要依靠陆上换流站维持电压与无功平衡<sup>[32]</sup>。随着风电规模的扩大,多端直流网络的分布式无功协同控制已成为未来的重要发展方向。

在功率平衡与波动抑制方面,风速变化会引起送出功率在短时间内快速波动,从而可能导致电网频率波动和调度压力增加。功率平衡策略通常包括基于短期预测的前馈调节、风机之间的有功协调控制以及风机与储能系统的联合运行<sup>[33-34]</sup>。在多风场并联或多端直流系统中,还需要通过潮流优化实现各通道功率分配的合理化,以减少单通道负荷的波动幅度,提高系统的整体稳定性<sup>[35]</sup>。

故障穿越与保护协调是保障海上风电送出系统在扰动条件下安全运行的关键环节。海上风电场通常需要具备低电压穿越和高电压穿越能力,以在电网电压波动期间保持并网运行。交流送出系统可通过快速切除故障点及利用环网结构保障供电连续性;直流系统则依赖分段隔离及故障电流限制技术实现快速保护与恢复。在多端直流系统中,保护策略的设计须兼顾选择性、快速性和通信可靠性,以应对复杂运行条件下的保护协调要求<sup>[36]</sup>。

在频率支撑与系统稳定性方面,现代风电机组可以通过控制策略模拟惯量或提供快速有功响应参与电网频率调节。在弱电网甚至孤岛运行条件下,送出系统还需要与储能装置或其他可调度电源协同,以实现一次和二次频率控制;而在跨区域互联场景中,则需要依托多端直流输电系统的功率调节能力,实现跨区频率的协调控制,从而增强整个电力系统的稳定性<sup>[37-40]</sup>。

此外,调度优化与辅助服务功能在海上风电送出系统中也愈发重要。通过优化机组输出功率曲线、动态调整功率因数、参与电网调频调压运行,可在确保安全的前提下提升运行经济性。结合数

字孪生、大数据分析等先进技术,可实现送出系统全生命周期的智能化调度与维护,进一步提升送出系统在未来高比例可再生能源电网中的灵活性、可靠性和适应性<sup>[41]</sup>。

## 1.2 大规模海上风电评估标准

### 1.2.1 海上风电安全稳定评估

海上风电的安全稳定性评估面临诸多挑战,如复杂的海洋环境、极端天气条件以及大规模并网对电网稳定性的影响。近年来,动态响应与疲劳分析技术、极端天气与灾害应对技术、电网接入与稳定性控制技术等方面取得了显著进展,为海上风电的大规模发展提供了保障。

海上风电机组长期处于复杂的海洋环境中,受到风、浪、流等多重载荷作用,导致结构动态响应复杂、疲劳损伤累积显著。近年来,数字孪生技术和实时监测系统的结合,为动态响应与疲劳分析提供了新的解决方案。文献<sup>[42]</sup>采用数字孪生技术,通过实时监控和预测性维护策略提升了浮式海上风力涡轮机的可靠性,从而提高了运行效率并减少了停机时间。文献<sup>[43]</sup>提出一种基于数字孪生的运维框架,涵盖故障监测与预测、安全生态管理和运维决策支持等应用。在此基础上,疲劳寿命预测的准确性得到显著提升,而疲劳损伤正是海上风机结构安全的主要威胁之一。近年来,基于机器学习的疲劳损伤评估方法逐渐成为研究热点。文献<sup>[44]</sup>提出基于机器学习模型修正的疲劳裂纹扩展预测方法,通过对比多种机器学习方法建立了CGR-ML模型,并通过实验验证了其在复杂载荷下能有效预测裂纹扩展,为海上结构疲劳损伤评估提供了新途径,有助于实现安全稳定性评估。文献<sup>[45]</sup>提出海洋结构疲劳损伤评估包括全局S-N方法,疲劳评估方法,断裂力学、局部方法和多轴疲劳等,介绍了疲劳损伤评估模型和残余疲劳寿命分析模型,为海上动态响应与疲劳分析实现安全稳定性评估提供了重要参考。

海上风电场的极端天气可能对风机结构造成严重破坏。例如,江苏盐城海上风电场曾在强风条件下出现风机倒塌,导致该风机报废。近年来,智能控制技术应用在极端天气预测与灾害应对中,通过预测风速变化、实时监控机械和电气组件状态以及自动调整运行参数,减少了系统故障的发生概率,提高了风电场的整体可靠性。该技术还显著提升了海上风电的安全性,并确保风力发电场在极端天气条件下安全稳定运行,降低故障风险和停机时间。文献<sup>[46]</sup>提出利用智能控制技术优化风力发

电场的功率输出、预测风速和功率、监测机械和电气组件的故障。在极端天气条件下,通过预测风速变化调整叶片角度和发电机输出,可避免超负荷运行,减少机械应力。并且智能控制系统可以实时监测机械和电气组件的状态,提前发现潜在故障以及自动调整风力涡轮机的运行参数,防止风机在极端天气条件下发生严重故障<sup>[47]</sup>。

大规模海上风电并网对电力系统的稳定性提出了严峻挑战,因为风电场接入可能引起局部频率振荡。例如,东海某柔直送出工程投运初期,随着风电场输出功率约增至额定功率的10%,风电场与柔直换流站间曾产生中频振荡,最终触发高频谐波保护跳闸。柔性直流输电和虚拟同步机技术是近年来解决这一问题的前沿方向。文献<sup>[48]</sup>研究了VSC-HVDC系统与海上风电场的集成,分析了系统参数、控制器和运行条件对VSC-HVDC系统动态行为的影响,包括换流器控制、稳定性分析等,提高了海上风电的电网接入与稳定性控制。文献<sup>[49]</sup>对VSC-HVDC系统和风力涡轮机建模,包括系统的动态方程、控制策略等,分析在不同运行条件下的动态特性,如频率响应、功率变化、转子速度波动等,揭示系统的稳定性问题和潜在的风险。虚拟同步机技术通过模拟同步发电机的运行特性,能够为电网提供惯性和频率支撑。文献<sup>[50]</sup>通过研究虚拟同步机对电力系统低频振荡的影响,提取系统模式信息,设计了一种分散式顺序协调的补充阻尼控制器,并验证了该方法能有效抑制振荡,提高系统安全稳定性。

结合现有研究,海上风电安全稳定性评估方法可从评估对象与技术手段两个维度进行分类,其优缺点及适用场景如表2所示。其中,结构安全与疲劳评估所采用的数值仿真、数字孪生等技术已得到广泛研究与应用<sup>[51-53]</sup>;针对极端天气应对的气象预测与智能控制策略,则主要参考了文献<sup>[54-55]</sup>的成果;而电网接入与稳定性方面的评估则依赖于

VSG-HVDC等技术<sup>[56-57]</sup>。

综上,结构与疲劳安全评估是基础环节,极端天气应对是降低突发风险的关键,而电网稳定性控制是保障大规模并网运行的核心。实际工程中应注重多方法融合,如在数字孪生平台中集成气象预测与电网仿真,实现风电场从结构安全到系统稳定的全链路评估与主动控制。

### 1.2.2 海上风电经济性评估

海上风电由于具有风能资源丰富、稳定性强等特点,已逐渐成为全球范围内的重要发展方向<sup>[58]</sup>。推进新型能源系统的建设是我国应对气候变化、实现“双碳”目标的关键路径之一。海上风电作为新型能源系统的重要组成部分正处于快速发展阶段,考虑大规模海上风电的经济性评估对项目的可行性、决策和未来的发展具有重要的意义<sup>[59-61]</sup>。海上风电的建设成本较高,但长期的收益潜力巨大,因此对其进行经济性评估,特别是初始投资、运营和维护成本评估,对于投资者和政策制定者至关重要。在不同的国家和地区,补贴、税收优惠等政策的支持对海上风电项目的经济性有着直接影响<sup>[62]</sup>,因此也可以将政策因素纳入海上风电的经济性分析中。

大规模海上风电项目经济性评估建立在全生命周期成本和收益之上<sup>[63]</sup>。文中主要介绍海上风电项目的全生命周期成本模型和经济性指标。海上风电的平均生命周期为20~30 a,可划分为初期投资、运营维护和项目结束回收3个阶段,相应的全生命周期成本模型也由初期投资成本、运营维护成本和回收成本构成,涵盖了从项目立项到退役回收的全部费用。

初期投资成本是指在海上风电项目建设过程中所需要的一切前期支出,主要是在项目的规划、设计、施工和建设阶段,通常占项目总成本的较大比重。项目规划是海上风电项目的准备阶段,主要包括风能资源调研、风电场选址、可行性评估分析和项目审批。海上风电项目规划成本主要取决于

表2 海上风电安全稳定性评估方法比较

Table 2 Comparison of safety and stability assessment methods for offshore wind power

评估对象	技术方法	优点	缺点	适用场景
结构安全与疲劳评估	数值仿真、数字孪生、机器学习疲劳寿命预测	精确模拟载荷与响应;数字孪生可实时更新;机器学习可捕捉非线性特征	数值仿真计算量大;数字孪生依赖高质量传感器数据;机器学习需要大量历史样本进行训练	新机型设计验证、长期运维监测、关键部件寿命预测
极端天气与灾害应对	气象模型预测、智能控制、冗余保护设计	可提前预警,减少结构应力与损伤;控制策略可优化运行	气象预测存在不确定性;控制策略须与电网调度和现场运维协同	台风、暴风多发海域及深远海风电场
电网接入与稳定	VSC-HVDC建模与控制、虚拟同步机技术、电压/频率支撑策略	提供惯量与无功支撑,改善动态稳定性;适应高比例新能源	控制参数整定复杂;对换流器建模与控制精度依赖高;相对传统HVAC并网方案投资与运维成本较高	大规模并网、弱电网接入、高波动性风电场

海上风电的装机容量和项目整体规模。海上风电项目通过公开招标方式确定最终的施工单位, 根据前期规划调研的结果进行采购。风电机组采购与安装成本通常是初期投资中最为重要的一项, 主要涉及到风电机组的采购费用、运输费用、安装费用等<sup>[64]</sup>。随着技术的不断发展, 风电机组的单机容量越来越大, 整体成本逐渐降低, 但仍然是初期投入的核心组成部分。海上风电项目需要建设特殊的海上平台和基础设施, 例如风机基础、浮动平台、海底电缆铺设、海上变电站等, 这些基础设施的建设需要大量的投资成本。当在远海深水地区时, 建设投资成本也会随之增加。海上风电场需要与陆地电网进行连接, 因此建设电力传输线路<sup>[65]</sup>、变电站以及与电网的接入设备也是初期投资成本的一部分。

初期投资成本可以表示为:

$$C_0 = C_p + C_b + C_i \quad (1)$$

式中:  $C_0$ 为海上风电项目的初期投资成本;  $C_p$ 为项目规划成本;  $C_b$ 为招标采购成本;  $C_i$ 为安装调试成本。

运营维护成本是指在海上风电项目建设完工并投入使用后, 在整个运营阶段所需要支出的各项费用, 该阶段的成本通常占项目全生命周期成本的比重较大。机组的可靠性会受到台风等海洋环境因素的影响, 这一定程度上决定了此阶段的成本和收益情况。因此海上风电项目运营和维护阶段的主要目标是尽可能地降低运营成本、提高可靠性以增加收入。提高可靠性的运营和维护技术有故障智能诊断与维护、尾流控制等。随着科学研究的深入和技术的进步, 海上风电的运营和维护成本已经下降 45%。

海上风电的运营和维护成本可以表示为:

$$C_M = C_f + C_j \quad (2)$$

式中:  $C_M$ 为海上风电项目的运营和维护成本;  $C_f$ 为固定支出成本;  $C_j$ 为出现故障后的维修成本。

海上风电的结束回收成本是在海上风电项目达到寿命、进入退役阶段后相关的拆除、回收、更换和环境恢复等费用。这一部分的成本虽然发生在项目的生命周期末, 但其规模和复杂性可能对整体项目的经济性产生重要影响, 因此有必要考虑结束回收成本。目前有两种方式, 一种是所有部件和基础被完全拆除, 即完全结束退役; 另一种是拆除部分旧的部件、更换新的部件, 旧的部件可以用于市政建设等, 即不完全结束退役。文中主要考虑完全结束退役回收。

结束回收成本可以表示为:

$$C_E = C_d + C_e + C_s + C_r \quad (3)$$

式中:  $C_E$ 为海上风电项目的结束回收成本;  $C_d$ 为海上风电机组拆卸成本;  $C_e$ 为废旧设备运输成本;  $C_s$ 为场地清理费用;  $C_r$ 为回收利用成本。

文献[66]研究了电-氢混合储能多目标规划问题, 成本也是影响规划问题的一个重要因素。为了考虑储能的经济性和利用率, 该研究考虑了海陆电-氢全生命周期成本, 包括投资建设成本、运行维护成本和回收重置成本。文献[67]对以深远海上风电为核心的能源岛的经济性进行分析, 主要对输电方案、输氢方案、电氢混合外送的经济性进行比较讨论。文献[68]从海上风能和波浪能利用、海上风机部件、风电运行参数等多个方面考虑了海上风电系统的能效、可靠性、安全性和经济性, 并与陆上风电系统进行了比较, 给海上风电系统的技术创新和可持续发展提供理论指导和实践参考。文献[69]开发了海上浮动式风电场的生命周期成本模型, 成本模型考虑了海上风电经济性的关键参数, 有助于未来海上风电建设发展的决策。

海上风电经济评价指标是用于评估海上风电项目经济可行性、盈利能力以及长期可持续性的一系列量化指标。项目内部之间的差异可以由不同的指标体现, 这些指标有助于投资者和政策制定者做出合理科学的决策, 可以为经济性优化指明方向<sup>[70]</sup>。常用的海上风电经济评价指标有投资回收期(payback period, PP)、净现值(net present value, NPV)、内部收益率(internal rate of return, IRR)、平准化能源成本(levelized cost of energy, LCOE)、投资回报率(return on investment, ROI)等。

PP 是海上风电项目初期投资成本全部收回所需要的时间。该指标是评估海上风电项目盈利能力的重要参考, 可以表示为:

$$T_p = \frac{C_h}{C_a} \quad (4)$$

式中:  $T_p$ 为投资回收期;  $C_h$ 为初期投资成本;  $C_a$ 为年净现金流量。

NPV 是海上风电项目未来所有现金流折算到当前时点, 减去初期投资后的净值。NPV 是评估海上风电项目经济性的重要指标, 如果 NPV 为正, 则表示项目可以盈利; 如果为负, 则说明项目不可行。该指标可以表示为:

$$V_N = \sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+r)^t} - C_0 \quad (5)$$

式中:  $V_N$ 为净现值;  $R_t$ 为第  $t$  年现金流;  $r$ 为折现率;

$n$ 为海上风电项目年限。

IRR 是使海上风电项目的净现值为零的折现率,其值越高,则项目的盈利能力越强。该指标可由式(6)求解。

$$\sum_{t=1}^n \frac{R_t}{(1+r_{IRR})^t} - C_0 = 0 \quad (6)$$

式中: $r_{IRR}$ 为内部收益率。

LCOE 是衡量海上风电项目每生产一单位电能所需的平均成本。考虑该项目全生命周期成本和总的电能产生的比值,平准化能源成本 $C_L$ 可以表示为:

$$C_L = \frac{\sum_{t=1}^n C_t}{\sum_{t=1}^n E_t} \quad (7)$$

式中: $C_t$ 为第 $t$ 年的运营成本; $E_t$ 为第 $t$ 年的发电量。

ROI 可以反映海上风电项目的获利程度,该指标可以表示为:

$$S = \frac{E_B}{C_A} \quad (8)$$

式中: $S$ 为投资回报率; $E_B$ 为海上风电项目运营期间平均税前利润; $C_A$ 为在海上风电项目寿命内的总成本。

文献[71]研究了一种低碳制氢方法的经济性,提出了一种新颖的海上风电电解制氢的成本技术经济模型,该模型确定了系统组件之间分摊的生命周期成本和平准化氢成本。文献[72]开发了一种新的综合分析模型,用于专用海上风电场制氢的可行性评估。使用贴现回收和净现值将所有成本预测到指定时间,以考虑资本随时间的价值,该模型有助于快速评估或优化海上风电场-制氢专用系统的经济性和可行性。综合考虑能源效益和运维成本,文献[73]建立了风-氢-水电网系统优化运行模型,从经济性、适应性、库容影响的不确定性等方面进行模拟分析,结果表明该战略和模式具有良好的经济效益和现实意义。结合数据库和相关论文中的最新数据和参数公式,文献[74]对浮动式海上风力发电机进行了生命周期成本分析,成本分析主要侧重于成本最小化,特别强调运行和维护成本、退役成本和平准化能源成本,这些都是评价风电经济性的关键因素。通过分析这些经济性指标,可以从收益和投资成本方面量化大规模海上风电的经济化程度,较低的 LCOE 和较高的 IRR、ROI 将使海上风电项目更具吸引力。

在高比例新能源电网中,受限于输电能力、负荷消纳和电力市场机制,海上风电可能面临弃电风险。这种风险不仅造成发电收益减少,还会增加单位发电量的运行成本,尤其在长周期低风速或电网

检修期间影响明显。因此,经济性评价应综合考虑弃电概率、储能或调度措施对弃电的缓解效果,以及由此引发的成本变化。

### 1.3 典型海上风电场并网与运行技术分析

为了验证并网与运行技术的工程适用性与效果,表3选取国内外典型的海上风电场工程案例,对其并网方式、运行策略和安全稳定性措施进行分析。

江苏如东海上风电场装机容量约 1 100 MW,离岸距离约 70 km,采用直流并网方式<sup>[75]</sup>。场内采用星形交流集电系统,通过海底电缆连接至陆上变电站。该项目在台风和强雷暴天气中曾出现短时停机,引入短期功率预测和动态无功补偿的调度策略后,均能有效提升并网稳定性<sup>[76-78]</sup>。运行数据显示,该风电场年利用小时数超 3 400 h,弃风率低于 1.5%。

福建平潭海坛岛海上风电场总装机容量约 111 MW,中心距长乐岸线约 35 km,采用工频交流并网方式,是福建省早期投运的中小容量海上风电示范项目<sup>[79]</sup>。该项目针对福建沿海台风频发特点,配备了叶片主动俯仰控制和直流故障快速切除策略,并结合数字孪生运维平台进行风机健康监测。该方法显著减少了极端天气下的停机时间,提高了系统的可用率。

广东阳江青洲一、二海上风电项目总装机容量超过 1 GW,单机容量高达 8 MW,离岸距离为 50~55 km,采用 VSC-HVDC 直流并网技术<sup>[80]</sup>。该项目的亮点是分布式储能和需求响应协同调度,在风功率快速下降时由储能提供短时支撑,保障了电网频率稳定。项目在全生命周期内引入了全海域监测系统,可实现对风速、浪高、盐雾等海洋环境的实时监测。

Hornsea One 海上风电场是全球最大的海上风电项目之一,总装机容量约 1.2 GW,离岸距离约 120 km(位于英国约克郡海岸外北海),采用高压交流海底电缆送出并网<sup>[81]</sup>。项目通过分区调度和冗余换流站设计,实现长距离、大容量送电的高稳定性。同时,运维阶段采用无人船和无人机进行海上设备巡检,可显著降低人工维护风险与成本。

上述工程案例表明:工频交流并网适合近海、中小容量风电项目,技术成熟且投资较低,但输电距离有限且对无功支撑能力有一定约束;高压直流并网适合远海、大容量风电项目,可灵活调节有功/无功功率并增强系统适应性,但投资和运维成本较高。数字孪生、储能调节及需求响应等新兴技术在提高系统安全性、运行可靠性和经济性方面展现出

表 3 国内外典型海上风电场并网与运行案例对比

Table 3 Comparison of typical offshore wind farms' grid integration and operation cases at home and abroad

项目名称	装机容量	离岸距离	并网方式	关键技术措施	安全性评估	经济性评估
江苏如东海上风电场	1 100 MW	约70 km	VSC-HVDC	星形交流集电系统; 中间电缆无功补偿	无功补偿增强电压稳定性	年利用小时数>3 400 h; 弃风率<1.5%; 投资成本低、运维成熟
福建平潭海上风电场	111 MW	约35 km	HVAC	叶片主动俯仰控制; 直流故障快速切除; 数字孪生运维平台	极端天气停机时间显著减少; 直流系统增强故障穿越能力	高可用率; 减少设备损伤、降低维护成本; 初始投资高
广东阳江青洲系列工程	>1 GW	50~55 km	VSC-HVDC	分布式储能; 需求响应调度; 全海域监测系统	储能平滑功率波动; 监测系统提升环境适应性	高比例新能源并网稳定; 储能提升经济收益; 设备规模大、投资高
Hornsea One	1.2 GW	>120 km	HVAC	分区调度; 冗余换流站设计; 无人船与无人机巡检	多端柔直架构高冗余; 长距离输电稳定性强	LCOE下降趋势明显; 长期运营与维护成本低

潜力。在应对极端天气时,叶片主动俯仰控制、快速故障切除和灵活调度的综合策略被实践证明为有效手段。

## 2 面向海上风电并网运行的优化调度研究

### 2.1 含海上风电的能源系统组成

海上风电具有较强的不确定性和反调峰特性,其接入电网将给电力系统的运行控制带来一定挑战。因此,海上风电与多能源协同运行是保证电力系统稳定性、提高能源利用效率的有效方式。当前,涉及海上风电的能源系统通常包括光伏发电、燃气轮机、抽水蓄能和远方清洁能源等多种电源形式。在这种背景下,海上风电与虚拟电厂、效能电厂的协同运行显得尤为重要<sup>[82]</sup>。

海上风电与多能源协同运行的研究主要集中在海上风电与光伏发电、抽水蓄能和远方清洁能源的结合上。近年来,国内外学者对于风光协同运行开展了大量研究,以提高能源利用效率、降低系统运行成本,并推动能源的可持续发展。由于风电和光伏发电的发电特征互补,即风电在夜间和冬季效益较好,而光伏发电在白天和夏季效益较好,因此协同运行可以平滑电能波动,提高电力系统的稳定性和可靠性,二者在互补性上具有很大优势。当前研究主要集中于调节新能源波动性、优化系统运行经济性以及考虑碳排放量<sup>[83]</sup>。另外国内外研究包括对电力系统的规划和优化,确定风电和光伏发电的合理装机容量、布局和运行策略以最大化系统的经济性和可靠性,以及对风电和光伏发电系统的精确控制以适应电力系统的实时需求、减小电力系统的波动、提高并网电站的整体效益。另外储能技术在海上风电和光伏发电系统中的应用也得到了极大关注,通过电池储能系统等技术,可以缓解由不稳定的天气条件导致的波动,提高系统的稳定性<sup>[84]</sup>。在海上风电与抽水蓄能协同运行方面,抽水

蓄能系统可以充当能源储存装置,将多余的风能转化为潜在能量,然后在需要时将其释放,以满足电力需求。这种能量存储和调度功能有助于平滑电力系统的波动,提高稳定性。对于海上风电与抽水蓄能的协同运行,国内外学者对此开展了大量研究。文献[85-89]以经济性为目标建立风电-抽水蓄能模型,文献[90]以低弃风率为目标进行优化调度,协同风电与抽水蓄能电站联合运行,提高清洁能源系统的灵活性和可调度性。文献[91]提出一种海上风电与可变速海水抽水蓄能电站联合运行的系统多时间尺度优化调度方法。与传统抽水蓄能机组相比,可变速海水抽水蓄能机组具有功率响应更快、调节范围更广、运行效率更高等优点,该新型抽水蓄能机组发展前景巨大。目前已经启动了海上风电与抽水蓄能协同运行的示范项目,以验证这一协同运行的可行性。这些项目通常包括建设抽水蓄能装置,与海上风电场集成,以进行实际的协同运行试验。在海上风电与远方清洁能源协同运行方面,将不同地点产生的清洁能源进行协调和协同操作,以满足更广泛的电力需求,这是一个相对新颖的领域。目前如何在保证系统安全稳定运行的前提下优化调度组合并且有效估算成本,仍是亟待研究的问题<sup>[92]</sup>。此外,跨区域能源输送、技术集成与运行优化、能源组合与系统调度、经济成本模型等问题尚有待解决。

### 2.2 含海上风电的能源系统调度问题

#### 2.2.1 含海上风电的能源系统调度模型

现有研究将含海上风电的能源系统调度模型按照应用研究场景分为基本优化调度模型、考虑灵活性的优化调度模型和考虑不确定性的优化调度模型,如图7所示。

基本优化调度模型以经济性、弃风率、可靠性为目标建立多目标优化函数<sup>[93]</sup>。经济性考虑分时电价、机组启停及维护成本;弃风率通过惩罚函数

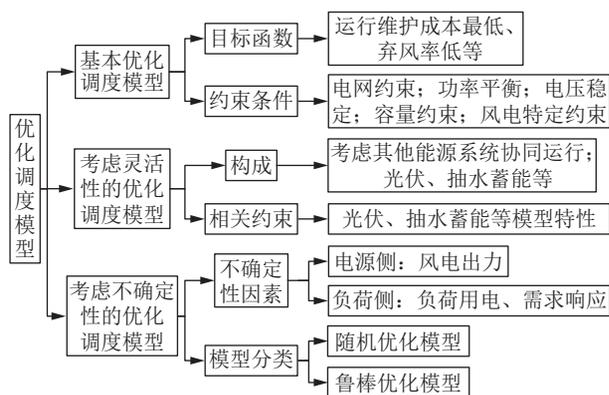


Fig.7 Optimal scheduling model classification

和预测误差动态设计阈值；可靠性引入“N-1”安全准则或风险评估指标。对应的约束条件包括电力系统约束、机组约束和风电约束，其中电力系统约束包括电力功率平衡约束、电压水平约束、动态潮流约束、节点电压波动限制，或考虑谐波抑制要求以及线路传输容量约束等；机组约束包括爬坡约束、出力上下限约束、风电机组的最小启停时间、启停次数限制等；风电约束包括单机功率上下限约束、风速与功率曲线约束、机组旋转备用约束、碳排放约束等。同时需要考虑海上风电机组疲劳损伤模型，以限制频繁功率波动对设备寿命的影响<sup>[94]</sup>。基本优化调度模型的优点是模型结构清晰、计算复杂度相对较低，适用于风电渗透率较低或小规模系统；局限性在于，难以充分利用储能等灵活资源，应对大规模风电波动的能力有限，面对强不确定性的适应性较差。

考虑灵活性的优化调度模型在约束上需要包含储能等可控资源，并考虑海上风电与光伏、抽水蓄能等多能源协同运行，同时结合需求响应策略以削峰填谷、促进风电消纳<sup>[95]</sup>。在多能互补方面，可利用风电-光伏出力相关性构建联合概率分布，并设计基于预测误差的抽水蓄能双向调节策略<sup>[96]</sup>；在混合储能系统方面，针对功率型与能量型储能响应差异，建立分层充放电优先级，通过动态规划优化不同时间尺度的出力比例，同时考虑储能寿命衰减成本<sup>[97-98]</sup>；在需求响应方面，通过分时电价和可中断负荷协议，构建工业用户负荷转移弹性模型，并用双层博弈协调用户收益与系统弃风率<sup>[99-100]</sup>。考虑灵活性的优化调度模型可提升系统经济性和调度灵活性、促进风电消纳、缓解波动影响，但模型复杂、对数据精度和多能协同控制要求高、工程实施难度较大。

考虑不确定性的优化调度模型需要应对电源

侧和负荷侧的随机波动：电源侧源自风电出力间歇性及预测误差；负荷侧源自用户用电行为随机性和需求响应偏差<sup>[101]</sup>。考虑不确定性的优化调度模型主要包括随机优化和鲁棒优化。随机优化通过场景法或机会约束法将不确定性问题转为确定性问题，能反映统计规律，但计算复杂度随场景数指数增长，且依赖精确概率分布<sup>[102-103]</sup>。鲁棒优化通过构建不确定集规避概率假设，可保证极端情况下系统的鲁棒性，但可能过于保守、经济性较低<sup>[104-105]</sup>。分布式鲁棒优化和信息间隙决策可兼顾统计特性与稳健性，适用于台风等低概率、高风险事件<sup>[106-109]</sup>；深度强化学习可在线学习高维不确定性下的实时调度策略<sup>[110-113]</sup>。该模型优点在于保障高风电渗透或极端事件下系统的稳定性；局限性是随机优化计算量大、鲁棒优化保守、混合方法复杂。

### 2.2.2 含海上风电的能源系统调度策略

海上风电出力具有明显的时空不确定性和反调峰特性，这可能导致日前调度方案与实际出力存在较大偏差，给系统电力平衡带来挑战。针对基本优化调度模型在应对大规模风电波动和不确定性方面的局限性，日内-实时调度策略应能动态修正日前计划，从而降低弃风率并提升系统经济性。

基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的滚动优化方法是当前研究的主要方向。MPC通过预测模型、滚动优化和反馈校正构建闭环控制，可在线根据实时测量数据调整控制策略<sup>[114-116]</sup>。预测模型通常采用物理-数据混合方法，如结合数值天气预报与深度学习模型进行短期风电功率预测，以降低预测误差；反馈校正利用实时量测数据和状态估计技术修正下一周期的初始条件，从而实现动态闭环调度<sup>[117-120]</sup>。对于考虑灵活性的调度模型，MPC可以协调储能、需求响应及多能互补资源，实现系统削峰填谷和风电消纳。在滚动调度过程中，通过储能充放电优先级控制和多时间尺度功率分配优化，可充分利用储能灵活性，缓解风电波动对电网的影响；结合需求响应机制，调度策略还可引导用户负荷转移，实现系统经济性与稳定性的平衡<sup>[121]</sup>。在不确定性较强的情景下，如高渗透率风电或极端天气事件下，MPC可结合多目标优化和深度强化学习，实现经济性-鲁棒性联合调度<sup>[122-123]</sup>。通过引入条件风险价值或动态调整权重系数，策略能够在低风险时段降低备用容量，在高风险时段保持安全性，从而提升系统的整体稳定性与调度可靠性<sup>[124-125]</sup>。

总的来看，基于MPC的日内-实时滚动调度策

略能够针对不同类型的调度模型特点, 弥补基本优化模型对不确定性适应性差、灵活性不足的问题, 在保证系统鲁棒性的前提下, 提升经济性和风电消纳效率。两阶段滚动协调调度框架进一步实现了日前调度计划与实时调度计划的有效衔接, 为大规模海上风电的优化运行提供可行途径。两阶段滚动协调调度框架如图 8 所示。

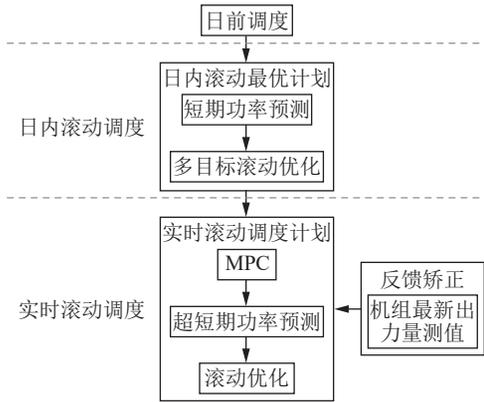


图 8 两阶段滚动协调调度框架

Fig.8 Two-stage rolling coordination scheduling framework

综上所述, 含海上风电的能源系统调度问题可通过不同的模型加以刻画, 并结合灵活的运行策略进行应对。然而, 模型和策略本身只是问题的表述和运行思路, 其最终能否在实际系统中落地, 仍依赖于合适的优化方法进行有效求解。因此, 进一步梳理调度优化方法, 并明确其在不同应用场景中的适用性与局限性, 显得尤为重要。

### 2.3 含海上风电的能源系统调度优化方法

为实现上述调度模型与运行策略, 需要运用多种优化方法对复杂问题进行建模与求解。现有研究大体可分为两类: 确定性优化方法和不确定性优化方法。确定性优化方法适用于风电渗透率较低、系统运行环境较为稳定的场景, 能够高效求解并获得较优解; 不确定性优化方法则针对海上风电出力的波动性和预测误差, 通过考虑风险约束来提升系统的鲁棒性与可靠性。接下来将对这两类方法进行系统梳理。

#### 2.3.1 含海上风电的能源系统确定性优化方法

含海上风电的能源系统确定性调度的本质是一个优化问题。根据不同优化调度算法的原理, 含海上风电的能源系统确定性优化调度算法大致可以分为 3 类: 启发式算法 (heuristic algorithm, HA)、传统数学规划 (mathematical programming, MP) 法、智能优化算法 (intelligence optimization algorithm, IOA)。表 4 为确定性优化调度算法的比较。

表 4 确定性优化调度算法比较  
Table 4 Comparison of deterministic optimal scheduling algorithms

算法类型	优点	缺点
启发式算法	结构简单, 易于实现	不能保证找到理论上的最优解, 并且无法量化结果的最优性
传统数学规划法	应用广泛	无法处理非凸的目标函数
智能优化算法	不受目标函数解析性质的限制	计算量大

启发式算法是一种根据人工经验或简化的优化模型约束条件获取问题可行解的方法, 通常被称为近似算法或不精确算法。启发式算法的结构简单, 易于实现, 并且通常能够在合理的时间内找到较好的解决方案。然而, 启发式算法不能保证找到理论上的最优解, 并且无法量化结果的最优性。

启发式算法在含海上风电的能源系统确定性调度中具有广泛的应用。例如, 使用源网荷储协调优化理念, 文献 [126] 提出了一种基于遗传算法的协调优化模型。通过算例结果验证, 该模型能够显著降低系统的综合运行成本, 并提高新能源的消纳水平。文献 [127] 针对考虑风能的经济调度问题, 提出了一种新的启发式算法。

含海上风电的能源系统确定性调度也可以用传统的数学规划方法求解。传统数学规划主要包括线性规划 (linear programming, LP)、非线性规划 (nonlinear programming, NLP)、整数规划 (integer programming, IP)、混合整数规划 (mixed integer programming, MIP) 等 [128]。传统数学规划主要方法包括内点法 (interior point method, IPM)、分支定界法 (branch and bound, BB)、割平面法 (cutting plane, CP)、动态规划 (dynamic programming, DP) 等。当优化模型满足一定前提条件时, 传统数学规划方法可以保证获得全局最优解 (global optimal solution, GOS) 和局部最优解 (local optimal solution, LOS)。文献 [129] 提出了考虑动态碳排放价格的风电并网系统多目标调度方法, 并以源-网-荷调峰特性为基础, 构建了一个考虑环境成本的源-网-荷协调运行模型。研究结果显示, 该模型不仅增强了海上风电的消纳能力, 还降低了系统运行成本, 减少了化石燃料的消耗。然而, 需要注意的是, 该模型并未考虑储能系统的优化调度。

传统的数学规划方法, 如等梯度法、牛顿法等, 通常假设成本曲线为凸函数, 并将其近似为凸二次或分段凸二次单调递增函数。然而, 如果对发电成本进行精细化建模, 并考虑到发电机阀点效应和禁止区间等复杂约束, 则发电成本函数将会是非连

续、非光滑、非凸的。在这种情况下,传统的数学规划方法并不适用,因为其无法处理非凸的目标函数。这时可以借助现代智能优化算法来解决这类经济调度问题。

基于随机搜索的智能优化算法不受目标函数解析性质的限制,能够有效解决含海上风电的能源系统确定性调度问题。这些现代智能优化算法通过在解空间中随机搜索和优化,寻找到最优解或近似最优解。相比传统的数学规划方法,智能优化算法具有更强的鲁棒性和全局搜索能力,可以应对非凸、非连续、非光滑的目标函数。总之,对于含海上风电的能源系统确定性调度问题,传统的数学规划方法可能无法有效地求解,而基于随机搜索的现代智能优化算法可以成为一种有效的解决方案。智能优化算法可以处理非凸的经济调度问题,并找到最优或近似最优解,从而提高能源系统的安全性和经济性。

此外,含海上风电的能源系统确定性调度需要考虑不同运营主体的隐私保护问题。分布式优化算法是一种能够保护不同主体信息隐私的调度优化方法。根据求解原理的不同,可以将优化算法分为原始分解类算法、对偶分解类算法和最优性条件分解类算法。原始分解类算法主要包括 Benders 分解和 Dantzig-Wolfe 分解。Benders 分解是将原问题分解成主问题和子问题,并通过求解子问题得到主问题的解的方法。Dantzig-Wolfe 分解则是将原问题分解成一系列子问题,并通过线性规划方法逐步求解这些子问题,最终得到原问题的解。对偶分解类算法主要包括拉格朗日松弛法,增广拉格朗日分解、交替方向乘法,辅助问题原理法和分析目标级联法。这些算法通过引入拉格朗日乘子或者增广拉格朗日函数将原问题转化为一系列子问题,通过迭代求解这些子问题来逐步逼近原问题的最优解。最优性条件分解类算法主要包括近似牛顿方向法和分解协调内点法。这些算法通过利用牛顿方向和内点法等数学技巧,将原问题分解为子问题,并通过求解这些子问题得到原问题的最优解。总的来说,上述分布式优化算法能够将原问题分解为一系列子问题,并通过求解这些子问题来逐步逼近原问题的最优解。上述算法可以在保护不同运营主体信息隐私的前提下,实现海上风电能源系统的确定性调度。

集群概念最早源自计算机和互联网技术领域,最初指由多台计算机组成的一个群体,这些计算机之间存在着松散或紧密的联系,在某些情况下可以

被看作一个完整的系统。在集群中,所有计算机承担相同的角色,并承担着同等的任务。设计集群的初衷是将多台计算机组合在一起,实现共享计算资源、提高性能和可靠性的目标。与单个计算机相比,集群具备更强大的计算能力和更好的可扩展性。集群可以采用不同的架构和拓扑,如对等网络结构、主从结构或冗余备份结构,以满足不同的应用场景和需求。集群技术被广泛应用于现代云计算、大数据处理、分布式存储、高性能计算等领域。集群技术可以灵活管理和调度计算资源,提升系统的稳定性和可用性,同时还能够提供高计算性能和存储能力,满足不断增长的业务需求。

海上风电集群优化是指通过合理规划和管理海上风电场中的风机布局、电网连接和运行策略,最大化风电集群的发电效率和经济性,并最大程度地减少风电系统的运行成本和对电网的影响<sup>[130]</sup>。海上风电集群优化的关键目标包括风机布局优化、电网连接优化、运行策略优化、可靠性和安全性优化等。风机布局优化:确定每台风机的位置和布局,以最大化风能的捕获效率。考虑海上风场的地理环境、风能资源分布、水深、海流等因素,通过数学模型和优化算法确定最佳的风机布局方案。电网连接优化:确定海上风电场与陆上电网的连接方式和容量。考虑电网的输电能力、电网稳定性和可靠性,通过优化算法确定最佳的电网连接方案,以最小化电网升级和运营成本。运行策略优化:制定合理的风机运行策略,包括风机启停控制、功率分配和电网调度等。通过优化算法和智能控制技术,最大化风机的发电效率,平衡风电系统的供需关系,减少风机之间的相互影响和对电网的冲击。可靠性和安全性优化:考虑海上环境的恶劣性和风机运行的不确定性,优化风电集群的可靠性和安全性。通过合理的风机维护和故障管理策略,最大限度地提高风机的可靠性和可用性。

含海上风电的能源系统确定性调度是一个复杂而具有挑战性的问题。通过合理利用各种研究方法和技術,可以提高海上风电的利用效率,并推动能源系统的可持续发展。未来,随着技术的进步和经验的积累,含海上风电的能源系统确定性调度将得到进一步优化,为推动清洁能源的发展和减少碳排放做出更大的贡献。

### 2.3.2 含海上风电的能源系统不确定性优化方法

海上风电出力的波动性和间歇性导致其具有强烈的不确定性,因此对于海上风电的不确定性优化问题,文中梳理了现有的相关优化方法,主要包括确定性优化方法、随机优化方法(stochastic opti-

mization, SO)、鲁棒优化方法(robust optimization, RO)以及分布式鲁棒优化方法(distributionally robust optimization, DRO)。

针对风电出力的随机性问题,可以采用确定性优化方法,也被称为备用容量法。其通过预留机组的正负旋转备用容量增大系统的备用容量,从而平衡风电波动性带来的影响。备用容量法计算简单、易于实现。备用容量的选择在经济性与安全性之间存在矛盾,若预留容量多,则导致成本过高、资源浪费;反之则导致弃风率高,影响系统安全稳定运行。然而,备用容量法难以全面考虑随机变量的波动范围,无法精确获得全局最优解,因此其无法将经济性与安全性做到统一。目前,关于如何对旋转备用进行优化配置,国内外已有大量研究。优化配置旋转备用容量这个问题分为发电侧和需求侧两个方面。在发电侧以成本最小化为优化目标,考虑污染气体排放量、弃风和切负荷的费用成本、最小化燃料耗量、风-光-抽水蓄能互补量等因素。需求侧则引入电动汽车、价格型需求响应和激励型需求响应等虚拟发电参与调度问题,从而优化配置旋转容量法的预留容量,以获得经济性与安全性的平衡。备用容量法的优化配置采用粒子群算法、内点法、遗传算法、植物生长算法等进行研究。

随机优化方法通常需要知道随机参数的概率分布,并对随机参数取期望,将模型转化为确定性模型求解,其解并不满足所有参数取值。对于海上风电的不确定性问题,现有研究方法主要包括应用场景法和机会约束法(chance-constrained programming, CCP)两种。

场景法通常采用海上风电概率模型,抽样不同出力的不同情况模拟风电的随机性,将不确定性出力转化成多个确定性场景进行分析。但是随着海上风电规模的不断扩大,场景数量和阶数均增加,计算复杂度大大提高,严重影响计算效率和速度。因此场景削减这一步骤非常关键,需要对大量场景进行削减合并,选择出具有代表性的场景。目前场景法主要包括多场景建模、概率分布、随机性考虑、鲁棒性优化这几个热门研究方向。当前,国内外研究多使用蒙特卡洛法、拉丁超立方抽样、自回归-滑动平均模型法、非参数的概率预测法、分布拟合算法、重要性抽样、场景树等算法进行场景生成,在对模型进行求解时通常使用 Benders 分解法、遗传算法、线性规划和整数规划、鲁棒优化、深度强化学习等优化算法进行优化决策。在场景削减方面,场景削减的要求是使削减后的场景求解的最

优值与未削减的场景最优值保持一致,目前存在的场景削减方法包括聚类与优化算法结合的方法<sup>[131]</sup>、快速前代消除技术<sup>[132]</sup>、同步回代消除<sup>[133]</sup>、综合递归聚类思想的多段嵌套削减<sup>[134]</sup>等。目前对于静态场景的研究较为丰富,但是针对动态场景、极端场景以及相应的场景削减需要进一步研究。

CCP 指模型的约束条件在一定概率下满足即可,不要求百分百满足所有条件。这种方法弱化了原有约束条件,可以提高系统的经济性,但在部分极端情况下,约束条件可能无法得到满足。这种方法可以降低不确定性给系统带来的影响,并且具有一定的鲁棒性以更好地适应动态环境,使其有更灵活的决策空间。但是机会约束条件不能直接求解,需要转换成确定性约束条件,因此模型的转化和求解比较复杂,概率约束的引入使其很难找到可行解。目前 CCP 在大规模海上风电的研究运用较少,文献<sup>[135]</sup>将 Copula 拟合的风、光联合出力函数作为 CCP 约束中的概率约束集。文献<sup>[136]</sup>采用基于可信性理论的模糊机会约束规划并且降低求解难度。文献<sup>[137]</sup>考虑了海上风电出力的模糊性,建立风电功率的模糊机会约束模型,得到最优调度策略。CCP 可以很好地处理海上风电的不确定性,但是如何对 CCP 的计算进行简化,以及如何处理极端情况下的风险问题是目前主要需要解决的问题。

鲁棒优化方法通常使用不确定区间或者集合描述不确定参数,在该变化范围内寻找一个最优解,使得不确定参数在区间或集合内任意波动时所有约束条件均能被严格满足。鲁棒优化法相对于确定性优化法和随机优化法有以下优势:(1)鲁棒优化不需要不确定参数的具体分布,而只需要其边界条件即可构建不确定区间;(2)所得的优化方案具有鲁棒性,能抵抗一些不确定性因素带来的影响;(3)根据鲁棒优化法得到的对等模型是一个确定性模型,可以用成熟的数学规划方法进行解决,适用于大中型电力系统。目前,鲁棒优化法已被广泛用于供应链管理、资源配置及电力系统等方面。传统的鲁棒优化法主要包括自适应鲁棒优化法和仿射鲁棒优化法。

从数学本质上看,面向海上风电的多时间尺度电力系统鲁棒优化调度模型为高维度、非线性规划问题,因此无法直接求解。其分析思路主要有两类,一是将决策变量近似表述为不确定性参数的线性函数进而求解,即应用仿射策略计算鲁棒优化模型的最优值;二是将鲁棒问题分解为主问题和子问题框架,依次迭代直至优化结果满足收敛条

件<sup>[138-142]</sup>。但是传统鲁棒优化法依然存在以下几点不足:(1) 如果不确定集设定过大,则会导致系统的调度过于保守,经济效益得不到保障,反之则导致调度过于乐观,影响系统的安全稳定性;(2) 风电出力预测区间受系统传输或机组影响无法直接使用。为了应对这些不足,可以将不确定集合的边界进行优化<sup>[143-144]</sup>,或者采用分布式鲁棒优化的方法进行解决。传统鲁棒优化都属于集中优化的范畴,难以适应多区域电力系统的调度需求。随着电力系统和市场的不断发展,各区域独立调度和隐私保护的重要性凸显,使分布式鲁棒优化成为非常热门的研究方向。

由于鲁棒优化实质上是在最劣场景下寻找最优解,其在保守性上仍有着很大的改善空间。分布鲁棒优化模型引入不确定性变量概率分布,对于改善鲁棒优化模型保守性具有重要的影响。分布式鲁棒优化方法在电力系统中的应用包括以基于多离散场景、KL 散度、Wasserstein 距离为代表的基于概率密度的方法和以基于确定性矩、考虑矩不确定性为代表的基于矩信息的方法。两大类方法与机会约束结合形成分布鲁棒机会约束方法<sup>[145-146]</sup>。现有海上风电优化调度研究主要通过历史数据构建模糊集,再构建两阶段分布鲁棒优化模型以刻画风电出力<sup>[147-148]</sup>、综合需求侧响应、多能耦合<sup>[149-150]</sup>等方面的不确定性。目前关于分布鲁棒在海上风电的应用,尚未有研究协同考虑海上风电功率和电网随机性故障间的随机性关联关系;对维度连续/离散混合分布不确定性的数据驱动分布鲁棒建模与求解方法有待进一步研究。计算复杂及耗时问题是限制分布鲁棒优化模型推广应用的主要障碍。

### 3 展望

#### 3.1 海上风电并网技术的未来发展趋势

发展大规模海上风电是我国构建以新能源为主体的新型能源系统和实现“碳达峰、碳中和”目标的重要举措。随着气象和海洋监测技术的进步,更准确地预测自然环境条件的变化,将有助于更好地理解海上风电集群的时空变化规律,为未来海上风电场的设计和运营提供更科学的依据。数字化和智能化技术将推动风电汇集与并网效能的全面提升,为海上风电集群的灵活运行提供更多的可能性,满足大规模海上风电集群在效率和可靠性方面的需求;同时也能够更加灵活地管理和调度电力系统的运行,更好地适应环境和降低对环境的影响。

大规模海上风电场具有容量大、距离远等特

点,通常采用 VSC-HVDC 技术并网,引入大量电力电子换流装置和直流输电线路。随着海上风电并网技术的发展,未来 VSC-HVDC 系统的结构将更趋灵活高效,例如可构建多端直流或柔性直流电网,以增强对海上风电波动性和不确定性的适应能力。同时,将建立更加精细的数学模型,提高系统精度和鲁棒性,并结合优化算法和机器学习方法,进一步提升系统的运行稳定性和可靠性。

#### 3.2 考虑含大规模海上风电集群的运行建模

海上风电作为清洁高效的可再生能源,具有风能密度高、风速稳定、单机容量大的特点。为了协调发电侧不确定性与负荷侧需求响应,研究含海上风电并网的新型电力系统的动态最优潮流、多时间尺度协同经济调度以及极端天气条件(如台风)下的鲁棒运行,将成为新能源集中式发电与并网领域的重要方向。未来,大规模海上风电集群的运行建模应考虑风电机组地理位置分布差异,并通过电网连接并网。由于集群由多个机组组成,需要进行内部协同优化,包括机组间功率调控,以最大化集群整体输出并减少个体功率不平衡,从而降低对电网的冲击。对于多并网点的风电集群,还需要开展更复杂的稳定性分析,考虑电压、频率及并网点间的协调运行,并结合储能和快速响应设备等灵活控制手段提高系统并网稳定性。同时,海底电缆网络的设计与优化也尤为关键,包括布置方案、电缆长度优化以及故障对集群并网运行的影响分析。可通过模拟断电范围和恢复时间,提出快速检测与修复方法,以降低故障带来的损失。

风速与功率的时空相关性是集群并网运行优化的核心环节,直接影响功率输出特性、并网行为和电力系统整体调度。基于 Copula 函数的非线性相关性建模、时间序列分析、机器学习及深度学习等方法可用于评估不同风电场之间的风速相关性,为经济调度和极端天气条件下的鲁棒并网运行提供科学依据,支持大规模海上风电的高效并网和清洁能源发展。

#### 3.3 考虑海洋环境不确定性的海上风电调度

海上风电作为可再生能源,在全球能源转型中具有重要地位,其运行不仅受风速和气候变化影响,还会受到海浪、海流及海底电缆等海洋环境因素干扰。大规模海上风电并网的核心挑战在于如何应对环境因素的不确定性,尤其在风电输出波动较大时,如何保证电网并网稳定性和调度效率。为此,能源系统调度模型须重点考虑海洋环境条件的不确定性,通过开发准确的不确定性分析方法,量

化风速、波浪高度和海流的随机性,并结合鲁棒优化、随机优化和风险管理进行并网调度决策。同时,可通过储备容量设置与多时间尺度协同调度,兼顾风电波动性与需求响应能力,提高系统并网调度的灵活性与效率。

考虑海上风电集群的复杂性,能源系统调度还需要进行多目标优化,包括最大化风电输出、最小化系统成本和保证系统并网稳定性。通过综合运用不确定性分析、鲁棒优化、风险管理以及多时间尺度调度,可显著提升风电系统并网运行效率和电网可靠性。未来研究应进一步结合复杂系统建模与控制策略,解决环境不确定性带来的复杂性,推动海上风电的安全高效并网运行。

### 3.4 数据驱动的海上风电不确定性优化

近年来,随着广域测量系统(wide-area monitoring systems, WAMSs)、先进计量基础设施(advanced metering infrastructures, AMIs)等信息系统在海上风电集群及其终端需求侧广泛部署,可感知的数据源逐渐丰富,呈现出多维异构、高分辨率、实时收集等特征。这些数据经过参数辨识、状态估计等处理后,可作为优化并网调度模型的输入,提升决策的可行性和可靠性。基于此,分布鲁棒优化和动态随机规划等数据驱动的不确定性优化方法得到进一步发展。其中,分布鲁棒优化可用于风电机组功率控制、海底电缆网络设计等策略,在不确定性条件下保证系统并网鲁棒性;动态随机规划则可实现风电机组群的协同控制,确保在海洋环境条件不确定性下每个时间步的并网调度最优,同时减少设备磨损。

另一方面,强化学习尤其是多智能体强化学习和深度强化学习(deep reinforcement learning, DRL)被引入海上风电集群调度,以应对环境的不确定性。通过智能体间的协同,整个风电集群可实现整体优化。DRL能够处理高维、连续状态和动作空间,实现长期累积效益优化,适用于风机维护和设备更换等长期策略。基于学习的优化方法将预测与优化结合,直接从数据中学习模型与策略,避免传统预测-优化两步方法的误差累积,提升大规模海上风电集群并网调度的效率与稳定性。此类方法具有自适应能力,可随环境变化和数据更新实时调整并网运行策略,为复杂海上风电系统的智能并网调度提供灵活解决方案。

### 3.5 海上风电在电力市场中的并网运行消纳

随着全球低碳转型的推进,各国加快电力市场建设,推动新型能源体系发展。北欧电力市场起步早、发展完善,为全球提供了经验借鉴<sup>[151-152]</sup>。我国

也在推进全国统一电力市场建设,力争到2025年形成初步体系,到2030年基本建成统一市场,实现新能源尤其是海上风电的广泛参与。海上风电出力具有随机性和波动性,传统固定上网电价无法体现电力时间价值,完善的多层次电力市场机制可保障海上风电收益,同时促进其与储能、制氢等灵活资源协同参与,实现电力供需优化和高比例可再生能源消纳,并支持风电集群安全并网运行。

海上风电与储能、制氢等技术的融合为市场参与提供了新途径。配置储能的海上风电可通过合理充放电提升系统利用率,缓解消纳难题,并增加运营收益<sup>[153]</sup>;联合运行后,海上风电可根据电价和负荷灵活调度,实现削峰填谷和系统平衡。海上风电制氢可降低送出成本,提高可再生能源利用率,同时增强经济性和市场竞争力。未来,多技术融合的能源系统将支撑高比例海上风电并网运行,为我国电力系统安全、稳定及清洁能源高效利用提供保障。

## 4 结语

在“碳达峰、碳中和”的战略背景下,海上风电凭借其显著优势,成为推动能源低碳转型和可持续发展的关键力量。随着陆上风电资源开发逐渐趋于饱和,海上风电的飞速发展不仅提高了发电效率,还能与多种产业深度融合,有力推动战略性新兴产业集群发展。文中聚焦海上风电集群的运行时空特性、汇集与并网控制策略,以及安全性和经济性评估,并结合典型工程案例进行分析。同时,全面综述了面向海上风电并网的优化调度研究现状,包括能源系统组成、调度问题、模型、策略及优化方法。期望文中的研究可为海上风电并网运行提供科学决策依据,助力海上风电产业稳健发展,推动我国能源结构加速向绿色低碳转型。

随着全球能源结构向低碳化加速转型,大规模海上风电的并网技术、运行建模、不确定性优化及市场化消纳已成为推动“双碳”目标落地的关键研究方向。未来研究需深度融合多学科理论与前沿技术:在并网层面,可通过构建柔性直流电网并结合数字孪生技术,提升深远海风电集群的灵活性与可靠性;在运行建模中,发展多时空尺度协同优化框架,破解台风等极端场景下的鲁棒性-经济性博弈难题;在不确定性管理上,依托数据驱动的分布鲁棒优化与深度强化学习,实现海洋环境随机性与电力系统动态性的自适应匹配;在市场机制中,探索海上风电+储能+制氢多能协同交易模式,以现货市场与绿证交易为纽带,激发源-网-荷-储全环节的灵

活性价值。然而,当前研究仍面临跨领域协同不足、复杂系统建模维度灾难、市场政策滞后等挑战,亟须构建技术-机制-生态三位一体的创新体系:技术上强化人工智能与物理模型的混合驱动,机制上完善适应高比例海上风电的容量补偿与风险对冲政策,生态上推动海洋能源-氢能经济-数字治理的深度融合。唯有通过理论突破、工程实践与制度设计的闭环迭代,方能在新型电力系统建设中实现海上风电从并网消纳向系统主导的跨越,为全球能源革命贡献中国方案。

#### 参考文献:

- [1] 瞿晟珉,应飞祥,秦少茜,等. “双碳”背景下海上风电维护策略研究现状与展望[J]. 智慧电力, 2023, 51(10): 23-30.  
QU Chengmin, YING Feixiang, QIN Shaoxi, et al. Research status and prospects of offshore wind power maintenance strategy under background of carbon peak and carbon neutrality [J]. Smart Power, 2023, 51(10): 23-30.
- [2] 王永真,潘崇超,韩恺,等. “双碳”目标下中国综合能源服务的态势辨析与理论架构[J]. 全球能源互联网, 2023, 6(4): 379-389.  
WANG Yongzhen, PAN Chongchao, HAN Kai, et al. Situation identification and theory architecture of integrated energy services under dual carbon goal in China[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2023, 6(4): 379-389.
- [3] 朱继忠,骆腾燕,吴皖莉,等. 综合能源系统运行可靠性评估评述 I: 模型驱动法[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2761-2776.  
ZHU Jizhong, LUO Tengyan, WU Wanli, et al. A review of operational reliability assessment of integrated energy systems I: model-driven method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(11): 2761-2776.
- [4] WANG Y J, WANG R, TANAKA K, et al. Accelerating the energy transition towards photovoltaic and wind in China[J]. Nature, 2023, 619(7971): 761-767.
- [5] 刘吉臻,马利飞,王庆华,等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考[J]. 中国工程科学, 2021, 23(1): 149-159.  
LIU Jizhen, MA Lifei, WANG Qinghua, et al. Offshore wind power supports China's energy transition[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 149-159.
- [6] 姚钢,杨浩猛,周荔丹,等. 大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(21): 33-47.  
YAO Gang, YANG Haomeng, ZHOU Lidan, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 33-47.
- [7] SHERMAN P, CHEN X Y, MCELROY M. Offshore wind: an opportunity for cost-competitive decarbonization of China's energy economy[J]. Science Advances, 2020, 6(8): eaax9571.
- [8] 阳岳希,贺之渊,彭程,等. 海上风电柔性直流外送系统主动支撑技术综述[J]. 高电压技术, 2025, 51(6): 2720-2733.  
YANG Yuexi, HE Zhiyuan, PENG Cheng, et al. Review on grid support control for VSC-HVDC connecting offshore wind farm[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(6): 2720-2733.
- [9] TALARI S, SHAFIE-KHAH M, CHEN Y, et al. Real-time scheduling of demand response options considering the volatility of wind power generation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 10(4): 1633-1643.
- [10] 马燕峰,李鑫,刘金山,等. 考虑风电场时空相关性的多场景优化调度[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(2): 55-65.  
MA Yanfeng, LI Xin, LIU Jinshan, et al. Multi-scenario optimal dispatch considering temporal-spatial correlation of wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(2): 55-65.
- [11] 张帅龙,郑可迪,刘学,等. 基于藤 Copula 理论的海上风电建模及电力市场运行分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(11): 134-142.  
ZHANG Shuailong, ZHENG Kedi, LIU Xue, et al. Modeling of offshore wind power based on vine Copula theory and electricity market operation analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(11): 134-142.
- [12] 杜刚,赵冬梅,刘鑫,等. 基于重尾分布的风电功率波动特性概率分布[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(7): 52-57, 72.  
DU Gang, ZHAO Dongmei, LIU Xin, et al. Probability distribution of wind power fluctuation characteristics based on heavy-tailed distribution[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(7): 52-57,72.
- [13] 郝文波,景菲,颜庆宇,等. 数据驱动下基于风电场景的多时间尺度调峰调度研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 115-126.  
HAO Wenbo, JING Fei, YAN Qingyu, et al. A multi-time scale peak shaving scheduling strategy based on wind power scenario using a data-driven method[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 115-126.
- [14] 彭曙蓉,彭家宜,杨云皓,等. 基于时变深度前馈神经网络的风电功率概率密度预测[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(3): 84-93.  
PENG Shurong, PENG Jiayi, YANG Yunhao, et al. Wind power probability density prediction based on time-variant deep feed-forward neural network[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(3): 84-93.
- [15] 牛东晓,赵东来,杨尚东,等. 基于改进粒子群算法的海上风电汇集方式与并网优化研究[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2019, 50(12): 3146-3155.  
NIU Dongxiao, ZHAO Donglai, YANG Shangdong, et al. Research on convergence mode and grid-connected optimization of offshore wind power based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2019, 50(12): 3146-3155.
- [16] 吴斌,米增强,杨玉新,等. 大型风机海上风电场集电系统拓扑优化[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2023, 50(6): 31-39.

- WU Jian, MI Zengqiang, YANG Yuxin, et al. Topology optimization of offshore wind farm power collection system with large wind turbine[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2023, 50(6): 31-39.
- [17] 申鼎发, 刘虹. 海上风电场集电线路拓扑及海缆截面优化[J]. *电气技术*, 2024, 25(10): 21-29.
- SHEN Dingfa, LIU Hong. Optimization of collector line topology and marine cable cross-section in offshore wind farms[J]. *Electrical Engineering*, 2024, 25(10): 21-29.
- [18] 苑玉宽, 陈小月, 黄海, 等. 基于改进单亲遗传算法的大规模海上风电集电系统拓扑优化[J]. *水电能源科学*, 2023, 41(1): 212-216.
- YUAN Yukuan, CHEN Xiaoyue, HUANG Hai, et al. Topology optimization of large-scale offshore wind power collection system based on improved partheno genetic algorithm[J]. *Water Resources and Power*, 2023, 41(1): 212-216.
- [19] PAN C Y, WEN S L, ZHU M, et al. DC collector system layout optimization for offshore wind farm with SPP topology[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2025, 16(2): 1269-1282.
- [20] SHEN X W, WU Q W, ZHANG H C, et al. Optimal planning for electrical collector system of offshore wind farm with double-sided ring topology[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2023, 14(3): 1624-1633.
- [21] 黄云明. 海上直流风电场研究现状及发展前景[J]. *科学技术创新*, 2020(12): 28-29.
- HUANG Yunming. Research on status and development prospect of offshore DC wind farm[J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2020(12): 28-29.
- [22] 肖浩庆. 适用于大规模海上风电的并网技术分析[J]. *电力设备管理*, 2019(9): 76-78.
- XIAO Haoqing. Analysis of grid-connected technology for large-scale offshore wind power[J]. *Electric Power Equipment Management*, 2019(9): 76-78.
- [23] 茹亚伦, 王海云, 李战龙, 等. 基于 CET 变换器的串联型风电全直流系统研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2024, 52(14): 13-24.
- RU Yalun, WANG Haiyun, LI Zhanlong, et al. A series connected wind power full DC system based on a CET converter[J]. *Power System Protection and Control*, 2024, 52(14): 13-24.
- [24] 杜杰, 李子润, 李国杰. 海上风电直流汇集 DC/DC 系统实时仿真方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(7): 170-177.
- DU Jie, LI Zirun, LI Guojie. Real-time simulation method for a DC/DC collection system in an offshore wind farm[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(7): 170-177.
- [25] REHMAN A, ALI KOONDHAR M, ALI Z, et al. Critical issues of optimal reactive power compensation based on an HVAC transmission system for an offshore wind farm[J]. *Sustainability*, 2023, 15(19): 14175.
- [26] BISWAS A K, AHMED S I, AKULA S K, et al. High voltage AC (HVAC) and high voltage DC (HVDC) transmission topologies of offshore wind power and reliability analysis[C]//2021 IEEE Green Technologies Conference (GreenTech). Denver, CO, USA. IEEE, 2021: 271-278.
- [27] 文卫兵, 赵峥, 李明, 等. 海上风电柔性直流系统设计及工程应用[J]. *全球能源互联网*, 2023, 6(1): 1-9.
- WEN Weibing, ZHAO Zheng, LI Ming, et al. Design and engineering application of offshore wind power VSC-HVDC system[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2023, 6(1): 1-9.
- [28] TANG Y J, ZHANG Z R, XU Z. DRU based low frequency AC transmission scheme for offshore wind farm integration[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2021, 12(3): 1512-1524.
- [29] 许烽, 史兴华, 黄晓明, 等. 经 DRU 送出的海上风电交流系统潮流计算方法[J]. *浙江电力*, 2024, 43(11): 47-56.
- XU Feng, SHI Xinghua, HUANG Xiaoming, et al. A power flow calculation method of DRU-based AC transmission systems for offshore wind power[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(11): 47-56.
- [30] YU Z, SONG Q, YUAN Z Y, et al. Transmission topology and control for ultra-large offshore wind bases integrating multiple offshore low-frequency AC links and onshore HVDC link[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2024, 39(5): 2797-2809.
- [31] 齐磊, 李志川, 孙兆恒, 等. 基于平准化度电成本的海上风电分频输电系统经济性分析[J]. *浙江电力*, 2024, 43(6): 101-108.
- QI Lei, LI Zhichuan, SUN Zhaocheng, et al. Economic analysis of fractional frequency transmission system for offshore wind farm based on leveled cost of electricity[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2024, 43(6): 101-108.
- [32] 陆振纲, 谢立军, 赵国亮, 等. 海上风电柔性低频送出系统无功电压协调控制策略[J]. *高电压技术*, 2023, 49(9): 3708-3720.
- LU Zhengang, XIE Lijun, ZHAO Guoliang, et al. Coordinated reactive power-voltage control strategy of flexible low-frequency transmission system for offshore wind power integration[J]. *High Voltage Engineering*, 2023, 49(9): 3708-3720.
- [33] 杨京渝, 罗隆福, 阳同光, 等. 计及谷时段风电消纳的储能系统平抑风电功率波动控制策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(10): 131-141.
- YANG Jingyu, LUO Longfu, YANG Tongguang, et al. Smoothing wind power fluctuation control strategy for an energy storage system considering wind power consumption in the valley period[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(10): 131-141.
- [34] 赵欣雨, 张云晓, 万乐, 等. 平抑百兆瓦级风电场功率波动的混合储能充放电协同控制策略[J]. *智慧电力*, 2023, 51(11): 23-29, 68.
- ZHAO Xinyu, ZHANG Yunxiao, WAN Le, et al. Charge-discharge cooperative control strategy for hybrid energy stor-

- age system for suppressing power fluctuation of hundred megawatt level wind farm[J]. *Smart Power*, 2023, 51(11): 23-29,68.
- [35] TANG X X, TANG Y Q, XU Y M. Suppression strategy for midpoint potential fluctuation of three-level wind power converter[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2022, 37(3): 2583-2592.
- [36] 涂睿, 向往, 郑双燕, 等. 基于直流大母线的大规模海上风电混合多端直流并网系统[J/OL]. *电网技术*, 2024: 1-12. (2024-10-28)[2025-06-13]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1604>.  
TU Rui, XIANG Wang, ZHENG Shuangyan, et al. Hybrid multi-terminal HVDC integrated system for large-scale offshore wind farms based on DC bus[J/OL]. *Power System Technology*, 2024: 1-12. (2024-10-28)[2025-06-13]. <https://link.cnki.net/doi/10.13335/j.1000-3673.pst.2024.1604>.
- [37] KABSHA M M, RATHER Z H. Adaptive control strategy for frequency support from MTDC connected offshore wind power plants[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2023, 38(3): 3981-3991.
- [38] 贾科, 董学正, 李俊涛, 等. 一种适用于海上风电经 MMC-MTDC 并网的电网侧故障穿越方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(21): 76-85.  
JIA Ke, DONG Xuezheng, LI Juntao, et al. A grid-side fault ride-through method suitable for offshore wind farms connected with MMC-MTDC[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(21): 76-85.
- [39] 李洪伟, 徐学帅, 熊晓川, 等. 面向分频传输系统的 Y-MMC 自适应反步控制策略[J]. *智慧电力*, 2024, 52(12): 35-42.  
LI Hongwei, XU Xueshuai, XIONG Xiaochuan, et al. Adaptive backstepping control strategy for Y-type modular multi-level converter facing fractional frequency transmission systems[J]. *Smart Power*, 2024, 52(12): 35-42.
- [40] 宋延涛, 范雪峰, 吴庆范, 等. 基于 MMC 的海上风电柔性直流送出控制策略研究[J]. *高压电器*, 2023, 59(12): 63-74.  
SONG Yantao, FAN Xuefeng, WU Qingfan, et al. Research on flexible DC output control strategy for offshore wind power based on MMC[J]. *High Voltage Apparatus*, 2023, 59(12): 63-74.
- [41] ACOSTA M N, GONZALEZ-LONGATT F, ROLDAN-FERNANDEZ J M, et al. A coordinated control of offshore wind power and BESS to provide power system flexibility[J]. *Energies*, 2021, 14(15): 4650.
- [42] CHEN B Q, LIU K, YU T Q, et al. Enhancing reliability in floating offshore wind turbines through digital twin technology: a comprehensive review[J]. *Energies*, 2024, 17(8): 1964.
- [43] XIA J J, ZOU G. Operation and maintenance optimization of offshore wind farms based on digital twin: a review[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 268: 113322.
- [44] FANG X, LIU G J, WANG H H, et al. Fatigue crack growth prediction method based on machine learning model correction[J]. *Ocean Engineering*, 2022, 266: 112996.
- [45] HASELIBOZCHALOE D, CORREIA J, MENDES P, et al. A review of fatigue damage assessment in offshore wind turbine support structure[J]. *International Journal of Fatigue*, 2022, 164: 107145.
- [46] FARRAR N O, ALI M H, DASGUPTA D. Artificial intelligence and machine learning in grid connected wind turbine control systems: a comprehensive review[J]. *Energies*, 2023, 16(3): 1530.
- [47] GAO Z W, ODGAARD P. Real-time monitoring, fault prediction and health management for offshore wind turbine systems[J]. *Renewable Energy*, 2023, 218: 119258.
- [48] HAGHI A, RAHIMI M. Control and stability analysis of VSC-HVDC based transmission system connected to offshore wind farm[J]. *Scientia Iranica*, 2019.
- [49] LIN C H, WU Y K. Overview of frequency-control technologies for a VSC-HVDC-integrated wind farm[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 112893-112921.
- [50] ZHAO M, YIN H, XUE Y, et al. Coordinated damping control design for power system with multiple virtual synchronous generators based on prony method[J]. *IEEE Open Access Journal of Power and Energy*, 2021, 8: 316-328.
- [51] NISPEL A, EKWARO-OSIRE S, DIAS J P, et al. Uncertainty quantification for fatigue life of offshore wind turbine structure[J]. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part B: Mechanical Engineering*, 2021, 7(4): 040901.
- [52] LI Y J, LIU Z, HE Z F, et al. Fatigue reliability analysis and assessment of offshore wind turbine blade adhesive bonding under the coupling effects of multiple environmental stresses[J]. *Reliability Engineering & System Safety*, 2023, 238: 109426.
- [53] MOU J M, JIA X F, CHEN P F, et al. Research on operation safety of offshore wind farms[J]. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2021, 9(8): 881.
- [54] GONÇALVES A C R, COSTOYA X, NIETO R, et al. Extreme weather events on energy systems: a comprehensive review on impacts, mitigation, and adaptation measures[J]. *Sustainable Energy Research*, 2024, 11(1): 4.
- [55] 时帅, 吴伟聪, 李媛媛, 等. 计及极端天气和海上风电制氢的综合能源系统优化运行[J]. *电网技术*, 2025, 49(6): 2293-2301.  
SHI Shuai, WU Weicong, LI Yuanyuan, et al. Optimal operation of comprehensive energy system considering extreme weather and offshore wind power hydrogen production[J]. *Power System Technology*, 2025, 49(6): 2293-2301.
- [56] ABU-ELANIEN A E B, ABDEL-KHALIK A S, MASSOUD A M. Multi-terminal HVDC system with offshore wind farms under anomalous conditions: stability assessment[J]. *IEEE Access*, 2021, 9: 92661-92675.
- [57] XUE T, LYU J, WANG H, et al. A complete impedance

- model of a PMSG-based wind energy conversion system and its effect on the stability analysis of MMC-HVDC connected offshore wind farms[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2021, 36(4): 3449-3461.
- [58] KANDROT S, CUMMINS V, JORDAN D, et al. Economic and employment impacts of offshore wind for Ireland: a value chain analysis[J]. *International Journal of Green Energy*, 2020, 17(11): 687-696.
- [59] WEI S R, FENG Y Y, LIU K L, et al. Optimization of power collector system for large-scale offshore wind farm based on topological redundancy assessment[J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, 194: 03025.
- [60] 刘钟淇, 吕循岩, 王哲, 等. 海上风电开发潜力与外送经济性分析[J]. *可再生能源*, 2024, 42(11): 1498-1503.  
LIU Zhongqi, LÜ Xunyan, WANG Zhe, et al. Development potential of offshore wind power and economic analysis of delivery[J]. *Renewable Energy Resources*, 2024, 42(11): 1498-1503.
- [61] 何义琼, 李鑫, 贾海清, 等. 考虑风电时空特性和相对波动率的平衡成本分摊方法[J]. *电力建设*, 2024, 45(1): 157-166.  
HE Yiqiong, LI Xin, JIA Haiqing, et al. Method for wind power balancing cost allocation considering spatiotemporal characteristics of wind power and relative volatility[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(1): 157-166.
- [62] VARELA-VÁZQUEZ P, DEL CARMEN SÁNCHEZ-CARREIRA M. Estimation of the potential effects of offshore wind on the Spanish economy[J]. *Renewable Energy*, 2017, 111: 815-824.
- [63] WANG Z W, WANG H, SANT T, et al. Subsea energy storage as an enabler for floating offshore wind hydrogen production: review and perspective[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2024, 71: 1266-1282.
- [64] GUO Y H, WANG H J, LIAN J J. Review of integrated installation technologies for offshore wind turbines: Current progress and future development trends[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 255: 115319.
- [65] YANG J, GE J, JIANG Z F, et al. Applicability of low frequency transmission technology in offshore wind power transmission scene[J]. *E3S Web of Conferences*, 2020, 182: 01001.
- [66] 符杨, 周颖龙, 葛晓琳, 等. 考虑海上风电不同时间尺度功率波动的源侧电-氢混合储能多目标规划[J]. *电网技术*, 2025, 49(8): 3244-3255.  
FU Yang, ZHOU Yinglong, GE Xiaolin, et al. Multi-objective planning of source-side electro-hydrogen hybrid energy storage for offshore wind power fluctuations across time scales[J]. *Power System Technology*, 2025, 49(8): 3244-3255.
- [67] 刘钟淇, 刘耀, 侯金鸣. 以深远海风电为核心的能源岛能源外送经济性分析[J]. *中国电力*, 2024, 57(9): 94-102.  
LIU Zhongqi, LIU Yao, HOU Jinming. Economic analysis of energy transmission for energy island based on deep-sea offshore wind farms[J]. *Electric Power*, 2024, 57(9): 94-102.
- [68] YANG C, JIA J, HE K, et al. Comprehensive analysis and evaluation of the operation and maintenance of offshore wind power systems: a survey[J]. *Energies*, 2023, 16(14): 5562.
- [69] MAIENZA C, AVOSSA A M, RICCIARDELLI F, et al. A life cycle cost model for floating offshore wind farms[J]. *Applied Energy*, 2020, 266: 114716.
- [70] WU Y K, SU Y S, SU P E, et al. Economics- and reliability-based design for an offshore wind farm[C]//2017 IEEE/IAS 53rd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS). Niagara Falls, ON, Canada. IEEE, 2017: 1-9.
- [71] HILL S J P, BAMISILE O, HATTON L, et al. The cost of clean hydrogen from offshore wind and electrolysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 445: 141162.
- [72] DINH V N, LEAHY P, MCKEOGH E, et al. Development of a viability assessment model for hydrogen production from dedicated offshore wind farms[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2021, 46(48): 24620-24631.
- [73] LIU Z, WANG H, ZHOU B W, et al. Optimal operation strategy for wind-hydrogen-water power grids facing offshore wind power accommodation[J]. *Sustainability*, 2022, 14(11): 6871.
- [74] YILDIZ N, HEMIDA H, BANIOTOPOULOS C. Operation, maintenance, and decommissioning cost in life-cycle cost analysis of floating wind turbines[J]. *Energies*, 2024, 17(6): 1332.
- [75] 徐进, 韦古强, 金逸, 等. 江苏如东海上风电场并网方式及经济性分析[J]. *高电压技术*, 2017, 43(1): 74-81.  
XU Jin, WEI Guqiang, JIN Yi, et al. Economic analysis on integration topology of Rudong offshore wind farm in Jiangsu Province[J]. *High Voltage Engineering*, 2017, 43(1): 74-81.
- [76] 赵峥, 李明, 田园园, 等. 江苏如东海上风电柔直工程系统谐振分析与抑制[J]. *电力建设*, 2023, 44(6): 144-152.  
ZHAO Zheng, LI Ming, TIAN Yuanyuan, et al. Resonance analysis and suppression in Jiangsu Rudong offshore wind power flexible DC system[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(6): 144-152.
- [77] 王亮, 刘亚南, 柳强, 等. 基于自启动系统的海上风电并网技术[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2024, 45(2): 134-140.  
WANG Liang, LIU Yanan, LIU Qiang, et al. Grid-connected technology of offshore wind power based on self-starting system[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2024, 45(2): 134-140.
- [78] 汪惟源, 窦飞, 蔡晖, 等. 柔性输电技术在江苏跨江输电通道的应用研究[J]. *电力电容器与无功补偿*, 2022, 43(2): 141-146.  
WANG Weiyuan, DOU Fei, CAI Hui, et al. Research on application of flexible AC/DC transmission technologies in Yangtze-river-crossing transmission channels of Jiangsu Province[J]. *Power Capacitor & Reactive Power Compensation*, 2022, 43(2): 141-146.

- [79] 中国长江三峡集团有限公司. 全球单机容量最大海上风电场——福建平潭外海海上风电项目全容量并网发电 [EB/OL]. (2023-07-18)[2025-06-13]. <https://www.ctg.com.cn/sxjt/xwzx55/zhxw23/1447021/index.htm>.  
CHINA Three Gorges Corporation. The World's largest single-capacity offshore wind farm: full-scale grid connection of the Pingtan offshore wind power project in Fujian [EB/OL]. (2023-07-18)[2025-06-13]. <https://www.ctg.com.cn/sxjt/xwzx55/zhxw23/1447021/index.html>.
- [80] 北极星电力新闻网. 92 台 11 MW! 阳江青洲一、二 1 GW 海上风电项目首批风机并网. [EB/OL]. (2023-12-18)[2025-06-13]. <https://news.bjx.com.cn/html/20231218/1350520.shtml>.  
POLARIS Power News Network. 92 units of 11 MW! The first batch of wind turbines in the 1 GW Yangjiang Qingzhou I & II offshore wind power project connected to the grid [EB/OL]. (2023-12-18) [2025-06-13]. <https://news.bjx.com.cn/html/20231218/1350520.shtml>.
- [81] MAQBOOL M A, RIZVI M J, LEE Y C, et al. Technical feasibility analysis of green energy storage options and hornsea wind farms[J]. *Energies*, 2025, 18(9): 2311.
- [82] 赵东来. 中国海上风电运营优化及发展研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2020.  
ZHAO Donglai. Operational optimization and development of offshore wind power in China[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2020.
- [83] 朱晔, 兰贞波, 隗震, 等. 考虑碳排放成本的风光储多能互补系统优化运行研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(10): 127-133.  
ZHU Ye, LAN Zhenbo, WEI Zhen, et al. Research on optimal operation of wind-PV-ES complementary system considering carbon emission cost[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(10): 127-133.
- [84] 王磊, 王昭, 冯斌, 等. 基于双层优化模型的风-光-储互补发电系统优化配置[J]. *太阳能学报*, 2022, 43(5): 98-104.  
WANG Lei, WANG Zhao, FENG Bin, et al. Optimal configuration of wind-photovoltaic-ess complementary power generation system based on bi-level optimization model[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2022, 43(5): 98-104.
- [85] 安源, 郑申印, 苏瑞, 等. 风光水储多能互补发电系统双层优化研究[J]. *太阳能学报*, 2023, 44(12): 510-517.  
AN Yuan, ZHENG Shen Yin, SU Rui, et al. Research on two-layer optimization of wind-solar-water-storage multi energy complementary power generation system[J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2023, 44(12): 510-517.
- [86] 王恩予, 邓英, 许小峰, 等. 基于低成本的海上风电综合能源系统调度策略[J]. *风能*, 2021(9): 62-68.  
WANG Enyu, DENG Ying, XU Xiaofeng, et al. Scheduling strategy of offshore wind power integrated energy system based on low cost[J]. *Wind Energy*, 2021(9): 62-68.
- [87] 王立平, 马实一, 郭旭, 等. 风电-光伏发电-抽水蓄能联合优化调度方法[J]. *水利经济*, 2024, 42(6): 58-63.  
WANG Liping, MA Shiyi, GUO Xu, et al. Wind power-photovoltaic power generation-pumped storage joint optimal scheduling method[J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2024, 42(6): 58-63.
- [88] 王博, 詹红霞, 张勇, 等. 考虑风电不确定性的风蓄火联合优化经济调度研究[J]. *电力工程技术*, 2022, 41(1): 93-100.  
WANG Bo, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, et al. Combined optimal economic dispatch of wind-storage-fire considering wind power uncertainty[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2022, 41(1): 93-100.
- [89] WANG J S, YIN X X, LIU Y K, et al. Optimal design of combined operations of wind power-pumped storage-hydrogen energy storage based on deep learning[J]. *Electric Power Systems Research*, 2023, 218: 109216.
- [90] 林俐, 岳晓宇, 许冰倩, 等. 计及抽水蓄能和火电深度调峰效益的抽蓄-火电联合调峰调用顺序及策略[J]. *电网技术*, 2021, 45(1): 20-32.  
LIN Li, YUE Xiaoyu, XU Bingqian, et al. Sequence and strategy of pumped storage-thermal combined peak shaving considering benefits of pumped storage and deep regulation of thermal power[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(1): 20-32.
- [91] 武荷月, 邓长虹, 李定林, 等. 海上风电与海蓄联合运行多时间尺度优化调度方法[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2021, 54(4): 361-368.  
WU Heyue, DENG Changhong, LI Dinglin, et al. A multi-time scale optimal dispatching method for combined operation of offshore wind power and seawater pumped storage[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2021, 54(4): 361-368.
- [92] 牛东晓, 赵东来, 杨尚东, 等. 考虑综合成本的海上风电与远方清洁能源协同优化模型[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2019, 46(12): 16-24.  
NIU Dongxiao, ZHAO Donglai, YANG Shangdong, et al. Collaborative optimization model of offshore wind power and remote clean energy considering comprehensive cost in power system[J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2019, 46(12): 16-24.
- [93] 黎静华, 朱梦姝, 陆悦江, 等. 综合能源系统优化调度综述[J]. *电网技术*, 2021, 45(6): 2256-2272.  
LI Jinghua, ZHU Mengshu, LU Yuejiang, et al. Review on optimal scheduling of integrated energy systems[J]. *Power System Technology*, 2021, 45(6): 2256-2272.
- [94] 朱昌辉, 边晓燕, 臧延雪, 等. 考虑场间功率时移的海上风电场群联合储能优化调度方法[J]. *电网技术*, 2024, 48(6): 2394-2403.  
ZHU Changhui, BIAN Xiaoyan, ZANG Yanxue, et al. Optimal scheduling method of offshore wind farm groups with energy storage considering power time shift between adjacent offshore wind farms[J]. *Power System Technology*, 2024, 48(6): 2394-2403.
- [95] 魏韡, 范越, 谢睿, 等. 平抑高比例新能源发电功率波动的

- 风-光-储容量最优配比[J]. 电力建设, 2023, 44(3): 138-147.
- WEI Wei, FAN Yue, XIE Rui, et al. Optimal ratio of wind-solar-storage capacity for mitigating the power fluctuations in power system with high penetration of renewable energy power generation[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(3): 138-147.
- [96] 康俊杰, 赵春阳, 周国鹏, 等. 风光水火储多能互补示范项目发展现状及实施路径研究[J]. 发电技术, 2023, 44(3): 407-416.
- KANG Junjie, ZHAO Chunyang, ZHOU Guopeng, et al. Research on development status and implementation path of wind-solar-water-thermal-energy storage multi-energy complementary demonstration project[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(3): 407-416.
- [97] 齐晓光, 姚福星, 朱天瞳, 等. 考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(10): 11-19.
- QI Xiaoguang, YAO Fuxing, ZHU Tiantong, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage in power system considering large-scale wind power integration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 11-19.
- [98] 李军徽, 付英男, 李翠萍, 等. 提升风电消纳的储热电混储能系统经济优化配置[J]. 电网技术, 2020, 44(12): 4547-4557.
- LI Junhui, FU Yingnan, LI Cuiping, et al. Economic optimal configuration of hybrid energy storage system for improving wind power consumption[J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4547-4557.
- [99] 江友华, 屈靖洁, 曹以龙, 等. 考虑风电-负荷及综合需求响应不确定性的能量枢纽双层优化运行及配置方法[J]. 电测与仪表, 2022, 59(3): 117-124, 162.
- JIANG Youhua, QU Jingjie, CAO Yilong, et al. Double-layer optimal operation and configuration method for energy hub considering uncertainty of wind power-load and integrated demand response[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(3): 117-124, 162.
- [100] 符杨, 刘智彬, 刘璐洁, 等. 基于主从博弈的海上风电接入系统鲁棒规划[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(16): 54-65.
- FU Yang, LIU Zhibin, LIU Lujie, et al. Robust planning of offshore wind farm integration system based on Stackelberg game[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 54-65.
- [101] 杜刚, 赵冬梅, 刘鑫. 计及风电不确定性优化调度研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2608-2627.
- DU Gang, ZHAO Dongmei, LIU Xin. Research review on optimal scheduling considering wind power uncertainty[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2608-2627.
- [102] 陈哲, 王榕裕, 郭创新, 等. 计及风电备用容量与需求响应的多备用资源鲁棒优化[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(10): 50-58.
- CHEN Zhe, WANG Luyu, GUO Chuangxin, et al. Robust optimization of multiple reserve resources considering reserve capacity of wind power and demand response[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(10): 50-58.
- [103] ZHANG Y C, LIU Y, SHU S W, et al. A data-driven distributionally robust optimization model for multi-energy coupled system considering the temporal-spatial correlation and distribution uncertainty of renewable energy sources[J]. Energy, 2021, 216: 119171.
- [104] LI Y B, ZHANG F, LI Y, et al. An improved two-stage robust optimization model for CCHP-P2G microgrid system considering multi-energy operation under wind power outputs uncertainties[J]. Energy, 2021, 223: 120048.
- [105] 赵毅, 王维庆, 闫斯哲. 考虑阶梯型碳交易的风光储联合系统分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(6): 127-136.
- ZHAO Yi, WANG Weiqing, YAN Sizhe. Distributionally robust optimization scheduling of a joint wind-solar-storage system considering step-type carbon trading[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(6): 127-136.
- [106] 曹金声, 曾君, 刘俊峰, 等. 考虑极限场景的并网型微电网分布鲁棒优化方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(7): 50-59.
- CAO Jinsheng, ZENG Jun, LIU Junfeng, et al. Distributionally robust optimization method for grid-connected microgrid considering extreme scenarios[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(7): 50-59.
- [107] 徐超然, 徐潇源, 严正, 等. 考虑风电统计特性挖掘的分布鲁棒优化调度方法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(2): 33-42.
- XU Chaoran, XU Xiaoyuan, YAN Zheng, et al. Distributionally robust optimal dispatch method considering mining of wind power statistical characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(2): 33-42.
- [108] 孔德政, 张靖, 何宇, 等. 区域综合能源系统 IGDT-MPC 双层能量优化调度[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3970-3979.
- KONG Dezheng, ZHANG Jing, HE Yu, et al. IGDT-MPC bi-layer energy optimal scheduling of regional integrated energy system[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3970-3979.
- [109] JIANG Y W, HUANG W J, YANG G M. Electrolysis plant size optimization and benefit analysis of a far offshore wind-hydrogen system based on information gap decision theory and chance constraints programming[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2022, 47(9): 5720-5732.
- [110] 于一潇, 杨佳峻, 杨明, 等. 基于深度强化学习的风电场储能系统预测决策一体化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 132-140.
- YU Yixiao, YANG Jiajun, YANG Ming, et al. Prediction and decision integrated scheduling of energy storage system in wind farm based on deep reinforcement learning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 132-140.
- [111] DONG H Y, ZHANG J C, ZHAO X W. Intelligent wind farm control via deep reinforcement learning and high-fidelity simulations[J]. Applied Energy, 2021, 292: 116928.

- [112] LEE N, WOO J, KIM S. A deep reinforcement learning ensemble for maintenance scheduling in offshore wind farms[J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124431.
- [113] FERNANDEZ-GAUNA B, GRAÑA M, OSA-AMILIBIA J L, et al. Actor-critic continuous state reinforcement learning for wind-turbine control robust optimization[J]. *Information Sciences*, 2022, 591: 365-380.
- [114] 赵靖英, 乔珩埔, 姚帅亮, 等. 考虑储能 SOC 自恢复的风电波动平抑混合储能容量配置策略[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(16): 5206-5219.
- ZHAO Jingying, QIAO Hengpu, YAO Shuailiang, et al. Hybrid energy storage system capacity configuration strategy for stabilizing wind power fluctuation considering SOC self-recovery[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(16): 5206-5219.
- [115] ABDELGHANY M B, AL-DURRA A, GAO F. A coordinated optimal operation of a grid-connected wind-solar micro-grid incorporating hybrid energy storage management systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2024, 15(1): 39-51.
- [116] HANNAN M A, ABU S M, AL-SHETWI A Q, et al. Hydrogen energy storage integrated battery and supercapacitor based hybrid power system: a statistical analysis towards future research directions[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(93): 39523-39548.
- [117] 赵福林, 俞啸玲, 杜诗嘉, 等. 计及需求响应的含大规模风电并网下电力系统灵活性评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(1): 42-51.
- ZHAO Fulin, YU Xiaoling, DU Shijia, et al. Assessment on flexibility of a power grid with large-scale wind farm integration considering demand response[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(1): 42-51.
- [118] 李鹏, 余晓鹏, 周青青, 等. 计及风电不确定信息间隙的火电-储能-需求响应多源低碳调峰交易优化模型[J]. *电力建设*, 2022, 43(12): 131-140.
- LI Peng, YU Xiaopeng, ZHOU Qingqing, et al. Multi-source low-carbon peak-shaving transaction optimization model for thermal power-energy storage-demand response considering the uncertainty information gap of wind power[J]. *Electric Power Construction*, 2022, 43(12): 131-140.
- [119] 乐健, 廖小兵, 章琰天, 等. 电力系统分布式模型预测控制方法综述与展望[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(23): 179-191.
- LE Jian, LIAO Xiaobing, ZHANG Yantian, et al. Review and prospect on distributed model predictive control method for power system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(23): 179-191.
- [120] 叶林, 路朋, 赵永宁, 等. 含风电电力系统有功功率模型预测控制方法综述[J]. *中国电机工程学报*, 2021, 41(18): 6181-6198.
- YE Lin, LU Peng, ZHAO Yongning, et al. Review of model predictive control for power system with large-scale wind power grid-connected[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2021, 41(18): 6181-6198.
- [121] LIU X J, GUO S F, KONG X B, et al. Offset-free stochastic MPC for uncertain wind energy conversion system[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2024, 20(7): 9487-9496.
- [122] WEI J, WU Q W, LI C B, et al. Hierarchical event-triggered MPC-based coordinated control for HVRT and voltage restoration of large-scale wind farm[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2022, 13(3): 1819-1829.
- [123] MA L L, KONG X B, LIU X J, et al. Offshore wind power generation system control using robust economic MPC scheme[J]. *Ocean Engineering*, 2023, 283: 115178.
- [124] LIU X J, FENG L, KONG X B. A comparative study of robust MPC and stochastic MPC of wind power generation system[J]. *Energies*, 2022, 15(13): 4814.
- [125] YIN X X, ZHAO X W. Data driven learning model predictive control of offshore wind farms[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2021, 127: 106639.
- [126] 姜琦, 黄堃, 赵俊, 等. 基于遗传算法的主动配电网“源网荷储”协调优化模型研究[J]. *电力与能源*, 2020, 41(1): 1-5,19.
- JIANG Qi, HUANG Kun, ZHAO Jun, et al. Study of "power-network-load-storage" coordinated optimization model for active distribution network based on genetic algorithm[J]. *Power & Energy*, 2020, 41(1): 1-5,19.
- [127] 朱继忠. 电网安全经济运行理论与技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- ZHU Jizhong. Theory and technology of safe and economic operation of power grid[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.
- [128] KARTHIK N, PARVATHY A K, ARUL R, et al. A new heuristic algorithm for economic load dispatch incorporating wind power[M]//Artificial Intelligence and Evolutionary Computations in Engineering Systems. Singapore: Springer Singapore, 2021: 47-65.
- [129] 栗楠, 王晓晨, 刘俊, 等. 高受电比例电网消纳大型海上风电的运营策略研究[J]. *可再生能源*, 2018, 36(6): 902-910.
- LI Nan, WANG Xiaochen, LIU Jun, et al. Operation strategy of large offshore wind power connected to the high power receiving proportion grid[J]. *Renewable Energy Resources*, 2018, 36(6): 902-910.
- [130] 吴文传, 李志刚, 王中冠. 可再生能源发电集群控制与优化调度[M]. 北京: 科学出版社, 2020.
- WU Wenchuan, LI Zhigang, WANG Zhongguan. Renewable energy power generation cluster control and optimal dispatch[M]. Beijing: Science Press, 2020.
- [131] 白斌, 韩明亮, 林江, 等. 含风电和光伏的可再生能源场景削减方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(15): 141-149.
- BAI Bin, HAN Mingliang, LIN Jiang, et al. Scenario reduction method of renewable energy including wind power and photovoltaic[J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(15): 141-149.

- [132] 杨震. 光热-光伏-风电联合出力特性分析和联合出力场景生成及削减方法的研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2022.  
YANG Zhen. Analysis on joint output characteristics of CSP-PV-wind power and research on joint output scenario generation and reduction methods[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2022.
- [133] 赵书强, 要金铭, 李志伟. 基于改进 K-means 聚类 and SBR 算法的风电场景缩减方法研究[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3947-3954.  
ZHAO Shuqiang, YAO Jinming, LI Zhiwei. Wind power scenario reduction based on improved K-means clustering and SBR algorithm[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3947-3954.
- [134] 张辰毓, 许刚. 分布式多元随机动态场景生成及快速精准场景降维算法[J]. 电网技术, 2022, 46(2): 671-681.  
ZHANG Chenyu, XU Gang. Distributed multivariate random dynamic scenario generation and fast & accurate scenario simplified algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(2): 671-681.
- [135] 包哲, 李薇, 张潇方, 等. 基于风、光联合出力仿真的多能联供系统鲁棒机会约束优化研究[J]. 系统仿真学报, 2024, 36(8): 1895-1913.  
BAO Zhe, LI Wei, ZHANG Xiaofang, et al. Study on robust chance constrained optimization of multi-energy supply system based on wind and solar power combined output simulation[J]. Journal of System Simulation, 2024, 36(8): 1895-1913.
- [136] 罗志将. 海上风电和储能参与电力辅助服务的策略研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2021.  
LUO Zhijiang. Research on strategies for offshore wind power and energy storage participating in power auxiliary services[D]. Nanchang: Nanchang University, 2021.
- [137] 孙艳, 陈雁, 莫东, 等. 基于风险分摊的多风电场机会约束机组组合求解方法[J]. 电网技术, 2022, 46(8): 2996-3007.  
SUN Yan, CHEN Yan, MO Dong, et al. Joint chance constrained unit commitment with wind farms based on risk sharing[J]. Power System Technology, 2022, 46(8): 2996-3007.
- [138] 刘国伟, 吴杰康, 马楠, 等. 考虑“风-荷”不确定性的海上“风-储”协同调峰优化模型[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(7): 1-10.  
LIU Guowei, WU Jiekang, MA Nan, et al. A collaborative peak shaving optimization model for offshore "wind-storage" considering the uncertainties of "wind-load"[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(7): 1-10.
- [139] 余光正, 崔朝越, 汤波, 等. 基于灵活性资源与风电协同互动可行域的鲁棒优化调度策略[J]. 现代电力, 2024, 41(5): 801-812.  
YU Guangzheng, CUI Chaoyue, TANG Bo, et al. Robust optimal scheduling strategy based on feasible region of cooperative interaction between flexible resources and wind power[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(5): 801-812.
- [140] 邱革非, 张鹏坤, 贺漂. 考虑风电接入的电力系统鲁棒经济优化调度[J]. 电力建设, 2021, 42(10): 101-109.  
QIU Gefei, ZHANG Pengkun, HE Piao. Economic dispatch of power system considering wind power integration[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(10): 101-109.
- [141] 陈伟伟, 张增强, 张高航, 等. 计及需求响应及抽水蓄能的含风电系统鲁棒机组组合[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 75-82.  
CHEN Weiwei, ZHANG Zengqiang, ZHANG Gaohang, et al. Robust unit commitment of power systems integrated wind power considering demand response and pumped storage units[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(2): 75-82.
- [142] 滕孟杰, 陈晨, 赵宇鸿, 等. 不确定风电接入下计及煤电机组深调和储能的电力系统分布鲁棒优化日前调度方法[J]. 电网技术, 2024, 48(8): 3122-3132.  
TENG Mengjie, CHEN Chen, ZHAO Yuhong, et al. Distribution robust optimal day-ahead dispatch method for power systems with uncertain wind power access considering deep peak regulation of coal-fired units and energy storage[J]. Power System Technology, 2024, 48(8): 3122-3132.
- [143] 周博, 艾小猛, 方家琨, 等. 计及超分辨率风电出力不确定性的连续时间鲁棒机组组合[J]. 电工技术学报, 2021, 36(7): 1456-1467.  
ZHOU Bo, AI Xiaomeng, FANG Jiakun, et al. Continuous-time modeling based robust unit commitment considering beyond-the-resolution wind power uncertainty[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(7): 1456-1467.
- [144] 魏震. 考虑需求侧响应的主动配电网优化运行研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.  
WEI Zhen. Research on optimal operation of active distribution network considering demand side response[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [145] 贺帅佳, 阮贺彬, 高红均, 等. 分布鲁棒优化方法在电力系统中的理论分析与应用综述[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(14): 179-191.  
HE Shuaijia, RUAN Hebin, GAO Hongjun, et al. Overview on theory analysis and application of distributionally robust optimization method in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 179-191.
- [146] 朱继忠, 董瀚江, 李盛林, 等. 基于分布式新能源集群的微能源网优化调度综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 7952-7970.  
ZHU Jizhong, DONG Hanjiang, LI Shenglin, et al. Review of optimal dispatching for the aggregation of micro-energy grids based on distributed new energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 7952-7970.
- [147] 张亚超, 黄张浩, 郑峰, 等. 基于风电出力模糊集的电-气耦合系统分布鲁棒优化调度[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(4): 44-53.  
ZHANG Yachao, HUANG Zhanghao, ZHENG Feng, et al.

- Distributionally robust optimal dispatch for power-gas coupled system based on fuzzy set of wind power output[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(4): 44-53.
- [148] 杨立滨, 曹阳, 魏韡, 等. 计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(16): 45-52.
- YANG Libin, CAO Yang, WEI Wei, et al. Configuration method of energy storage for wind farms considering wind power uncertainty and wind curtailment constraint[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(16): 45-52.
- [149] 尚文强. 考虑需求侧响应不确定性的多能互补微电网两阶段鲁棒优化协同调度方法[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- SHANG Wenqiang. Two-stage robust optimal cooperative scheduling method for multi-energy complementary micro-grids considering demand-side response uncertainty[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2023.
- [150] 曾子龙, 李勇, 丁心志, 等. 考虑线路动态电热特性的交直流系统分布鲁棒潮流优化策略[J]. *电工技术学报*, 2024, 39(21): 6700-6719.
- ZENG Zilong, LI Yong, DING Xinzhi, et al. Distributionally robust power flow optimization strategy for hybrid AC/DC grids considering dynamic electro-thermal properties of lines[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2024, 39(21): 6700-6719.
- [151] 程建东, 赵浩然, 韩明哲. 市场机制下推动风电参与电力市场的实践总结与启示[J]. *电网技术*, 2022, 46(7): 2619-2631.
- CHENG Jiandong, ZHAO Haoran, HAN Mingzhe. Practice summary and enlightenment of promoting wind power to participate in power market under market mechanism[J]. *Power System Technology*, 2022, 46(7): 2619-2631.
- [152] HALKOS G E, TSIRIVIS A S. Electricity prices in the European union region: the role of renewable energy sources, key economic factors and market liberalization[J]. *Energies*, 2023, 16(6): 2540.
- [153] SCOLARO M, KITNER N. Optimizing hybrid offshore wind farms for cost-competitive hydrogen production in Germany[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2022, 47(10): 6478-6493.

作者简介:



朱继忠

朱继忠(1966),男,博士,教授,博士生导师, IEEE Fellow, 意大利博洛尼亚科学院外籍院士,研究方向为综合智慧能源系统优化运行与控制(E-mail: zhuji@scut.edu.cn);

高美云(2003),女,硕士在读,研究方向为含海上风电的新型电力系统鲁棒优化调度;

肖鹏飞(1996),男,博士在读,通信作者,研究方向为新能源电力系统规划与优化运行(E-mail: eppfxiao@mail.scut.edu.cn)。

## Review of grid integration and operation technologies for large-scale offshore wind power

ZHU Jizhong, GAO Meiyun, XIAO Pengfei, DONG Hanjiang, ZHU Haohao, LIN Kaixin

(School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China)

**Abstract:** In the context of China's strategic goals of achieving carbon peak and carbon neutrality, as well as the construction of a new power system and a new energy system, offshore wind power has become an important direction for the development of renewable energy. Current research focuses on offshore wind power through grid integration methods and related technologies, promoting the stable and healthy development of the offshore wind power industry. A comprehensive review of research on optimal scheduling for the grid-integrated operation of offshore wind energy systems is provided in this paper. Firstly, the spatiotemporal characteristics, aggregation strategies, grid integration technologies, and transmission control strategies of large-scale offshore wind power clusters are analyzed. Their operational mechanisms and evaluation frameworks within the context of new energy systems are explored, and typical engineering cases are further examined. Then, the current state of research on optimization scheduling for offshore wind power grid integration is comprehensively reviewed, with a focus placed on the composition of energy systems incorporating offshore wind power, scheduling issues, and optimization methods. Finally, the development trends of grid integration and operation of offshore wind power in new energy systems are forecasted, and the key technical directions requiring further study are highlighted, aiming to provide reference for subsequent research and promote the high-quality development of offshore wind power.

**Keywords:** offshore wind power; renewable energy; new energy systems; cluster characteristics; grid integration; optimization scheduling

(编辑 陈雯嘉)