

中国海上风电支撑结构一体化设计综述

周映鸣, 闫姝, 刘鑫, 张波, 郭雨桐, 郭小江

(中国华能集团清洁能源技术研究院有限公司, 北京市 昌平区 102209)

Summary of Offshore Wind Support Structure Integrated Design in China

ZHOU Yiming, YAN Shu, LIU Xin, ZHANG Bo, GUO Yutong, GUO Xiaojiang

(China Huaneng Group Clean Energy Research Institute Co., Ltd., Changping District, Beijing 102209, China)

摘要: 对当前中国海上风电在风机、塔架与基础一体化设计领域的研究进行了回顾, 从降载优化技术、结构优化技术、工程探索与应用方面探索了一体化设计的可行性, 给出了在海上风电支撑结构轻量化的优化目标下可采用的一体化设计的关键技术和实施途径。研究表明, 中国海上风电行业需要从提供一体化设计的前提条件、当前阶段可采用的技术、下一步的研究方向3个层次逐步落实, 在海上风电走向平价上网的大背景下, 业主工程师与第三方认证机构需要起到更大的推动作用。

关键词: 海上风电; 一体化设计; 全局最优设计; 结构轻量化设计

ABSTRACT: This paper reviewed the current development research of China's offshore wind power industry in the field of integrated design of wind turbine, tower and foundation. This paper explored the feasibility of integrated design from the aspects of load reduction optimization technology, structural optimization technology and engineering exploration and application, and discussed the key technologies and implementation methods of integrated design that can be adopted under the optimization goal of lightweight offshore wind turbine support structure. The research shows that China's offshore wind power industry needs to be gradually implemented from three levels: providing the prerequisites for integrated design, using the technologies that can be adopted at the current stage, and exploring the next research directions. In the context of offshore wind power moving towards grid parity, owner-engineers and third-party certification bodies need to play a greater role in promoting the integrated design method.

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1506600); 中国华能集团有限公司科技项目(HNKJ20-H07)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China (2020YFB1506600); Science and Technology Project of China Huaneng Group Co., Ltd. (HNKJ20-H07).

KEY WORDS: offshore wind power; integrated design; global design optimization; structure lightweight design

0 引言

因海上风资源更为丰富、不占用土地、距离用电负荷中心近等优势, 海上风电成为我国加快能源转型的重要途径^[1-4]。大力发展海上风电, 有利于地区经济结构升级, 有助于确保能源供给安全, 可以促进前沿技术进步, 能够为我国实施海洋强国战略提供支撑^[5]。

根据华能清能院统计, 2019—2021年期间江苏、辽宁和浙江3个省份的已建与在建海上风电项目投资概算在17 000~20 000元/kW, 如果要实现低于0.5元/(kW·h)的电价甚至标杆电价, 投资造价需降低至10 000元/kW以下。其中, 主机费用占比为33.67%~38.10%; 支撑结构(塔架和桩基)费用占比为18.16%~25.74%; 海缆费用占比为8.21%~11.42%; 升压站费用占比为5.11%~6.19%; 吊装费用占比为4.70%~5.53%; 其他费用(含用海费、勘察设计、预备费等)占比为17.28%~21.12%。与陆上风电造价最大的不同在于, 海上风电的桩基和塔架占比更高, 约占总造价的1/4。

海上风电在助力“双碳”目标中发挥着重要作用。在“十四五”期间, 海上固定式风电是否能够实现平价开发将直接影响该行业的未来发展。从中国开始建设海上风电以来, 支撑结构一体化设计一直被业主、风机厂、设计院、高校等机构提及, 但是目前仍然没有形成真正统一的定义和设计标准。2021年是海上风电享受国家补贴的最

后一年,2022年起新投产的项目将开始由平价上网逐步走向竞价上网。随着“抢装潮”过后市场阶段性萎缩、平价上网倒逼风机厂家降低利润率等形势的发展,2021年底招标的海上风电项目主机(含塔筒)最低中标价已达到3 830元/kW,相比于“抢装潮”最高价降低了约40%^[6]。整体项目投资预计降低至13 000元/kW以下,但距离平价或者接近平价仍有不小差距,因此对整体投资占比第二高的支撑结构也亟须协同降本。支撑结构的降本除了通过降低钢材等原材料的价格来实现外,结构轻量化设计是最有效的途径。

由于行业分工,在当前海上风电支撑结构的传统设计方法中,载荷计算和塔架结构设计优化由主机厂负责,基础结构设计优化由设计院负责。该传统设计方法人为地将整个非线性系统切割为2个子系统,既无法获得多种载荷作用下的整体结构响应,也无法对整体结构进行全局优化设计。

自海上风电发展以来,海上风电支撑结构一体化设计(以下简称“一体化设计”)的概念^[7-10]一直被学术界和工业界提及,即对风机、塔架和基础建立一个整体动力学模型,开展风、浪、流等环境载荷和风电机组控制系统共同作用下的一体化载荷分析和结构优化。一体化设计是海上风电“卡脖子”的关键技术。

本文提出了一体化设计的定义和技术难点,介绍了一体化设计方法在国外的研究与应用情况,围绕载荷计算、结构优化和实际工程应用情况,分析了当前国内一体化设计的发展现状,从必备前提、当前可采用的技术及未来研究方向3个层面给出了实施路径,并展望了一体化设计方法在推动海上风电平价上网方面的应用前景。

1 一体化设计的技术难点

本文给出的一体化设计定义是:在实际项目给定了机组及大部件配置后,通过对环境参数的精细化处理,对风机、塔架和基础结构的设计变量进行迭代优化设计,在满足风电机组的适应性和安全性的前提下,达到降低项目投资成本的目标。本文中风机的设计变量主要是偏航变桨角度、速率,发电机转矩,以及切入、切出转速等控制

参数;塔架和基础结构的设计变量包括直径、壁厚、长度等几何参数;最终的优化目标是在满足安全要求的前提下,得到造价最低的支撑结构设计方案。由于支撑结构的造价一般与其质量直接相关,因此通常将支撑结构的质量作为优化目标。

一体化设计包含了空气动力学、水动力学、结构动力学、岩土力学、控制系统和优化算法等多个研究方向;涉及的专业部门包括跨公司的勘察设计、载荷仿真、系统控制、塔架、海工结构、金属结构等;涉及的标准规范包括IEC系列国际标准,DNV、Eurocode、DIN系列欧洲标准,API系列美国标准,国内港工设计标准和部分行业标准;涉及的软件包括BLADED、FAST、HAWC2、SACS、SESAM、ANSYS、ABAQUS等商业软件,以及各公司、研究院自主开发的软件。

在一体化设计的研究和应用中,技术难点包括以下方面:1)主机厂家与设计院使用的不同理论、标准和软件亟须统一与相互验证;2)设计变量及设计域的开放性与实际工程之间的矛盾亟待解决;3)超多工况的计算效率与项目工期要求的矛盾亟待解决;4)载荷、控制与结构迭代设计与全局优化方法的矛盾亟待解决;5)已有规范、新型结构与工艺突破的矛盾亟待解决。

2 国外研究与应用

2.1 研究现状

国外学者最早研究一体化设计时已经聚焦在风机控制策略与一体化建模等关键技术上。Fischer等^[11]针对深水单桩基础的风电机组提出了新的控制策略,有效降低了风机载荷和建造成本。Loukogeorgaki等^[12]基于FAST和MicroSAS软件,耦合开发了可对固定式海上风电机组进行整体分析的工具MicroSAS-OWT,这是首次对海上风电机组进行一体化建模和载荷计算的软件开发。

随后,国外学者对结构降本设计开展了研究。Haghi等^[13]对西门子海上3.6 MW机组的塔架、过渡段和基础的壁厚同时进行优化,以质量最小为目标函数,以结构的屈曲、频率和疲劳损伤等力学性能为约束,实现了12.1%的减重效果。Chew等^[14]考虑尺寸、频率、极限和疲劳载荷约

束,采用敏度解析算法对导管架基础的整体风机支撑结构进行优化,经29轮迭代后其质量减少了52%。Ashuri等^[15]分别采用分离式结构设计、分离式构型设计、一体化构型结构设计对海上支撑结构进行优化,结果表明,一体化设计可以更有效地降低平准化度电成本(levelized cost of energy, LCoE)。Theo等^[16]采用有限元方法对支撑结构进行优化,结果发现,结构的疲劳和频率是控制约束,通过优化算法可达到19.8%的减重效果。

以上研究都对一体化设计进行了探索,但这些研究未采用工业界的结构校核标准,既未考虑采用放宽频率约束及优化控制策略等可能更有效的技术,也未考虑结构变化会引起载荷变化的情况,是基于理想优化模型进行的研究,所给出的方法和结论未经落地验证或第三方机构认证,不能直接在工程项目中采用。

2.2 工程应用

在工业界, DNV GL^[17]的FORCE(for reduced cost of energy)项目技术团队明确了大型海上风机及其支撑结构的一体化设计方法能够降低度电成本的程度,如果联合应用4项技术(整体设计、放宽频率约束、增强控制策略和更细长更快速的叶片),海上风力发电成本将有望降低10%,但一体化设计方法的真正实施还需要同时改变行业的设计、工程制造模式和采购方式,所提出的4项技术是一体化设计的雏形。

在软件开发方面, DNV GL基于SESAM软件开发了与BLADED的接口,以“超单元”方式提供了一体化的载荷计算和结构校核功能; Bentley基于SACS软件开发了与BLADED、FAST等载荷计算软件的接口,也提供了多种风机基础一体化设计的解决方案。

以上方法的提出和软件工具的开发为探索一体化设计方法与工程落地提供了理论基础与操作工具。

3 国内研究与应用

3.1 降载优化技术

自中国开发海上风电以来,业主、风机厂、设计院、高校和研究院主要围绕减小载荷和结构优化技术进行了相关研究。赵向前等^[18]对海上风

电项目前期核准一体化应用、海上风电场自然条件与风电机组选型的一体化设计、风机基础与风电机组一体化设计、海上风电项目建设期一体化施工组织设计、海上风电场运营一体化信息平台设计提出了设想,并在国内首次对DNV GL的FORCE项目的一体化设计理念进行了解读。翟恩地等^[19]基于数字化云平台海上一体化设计(integrated design offshore, iDO)和传统分布迭代法进行设计分析,对比极限工况和疲劳工况下的结构安全指标,通过一体化设计考虑了支撑结构在风、浪、流耦合下的载荷,表明了采用一体化设计方法可以在结构强度、变形、疲劳损伤等指标方面有较大下降幅度。该研究是国内主机厂商首次基于云计算技术建立一体化分析平台,提供了与其他设计方共同开展一体化设计的可能性。

载荷是影响结构质量的直接原因,结构轻量化是一体化设计的目标。因此,如何通过降载方法实现整体支撑结构轻量化也成为研究者最先关心的问题。吴俊辉等^[20]分析了海上风力发电机组的载荷来源及其特性,以三叶片水平轴大型海上风力发电机组为研究对象,利用BLADED进行全耦合仿真分析,采用分段停机控制、软切出、塔架加阻等控制方法降低了海上风电机组运行载荷,有效增加了机组及支撑结构的安全性。王宇航等^[21]采用BLADED和SESAM软件建立风机、塔架和基础的一体化模型,在模型上同时施加风、浪载荷进行计算,对比了极限工况下的海上固定式风电机组一体化载荷与传统迭代设计载荷结果,验证了一体化方法可以有效降低极限载荷。

以上研究表明,在同样的机组和支撑结构下,优化控制策略可以作为降载的有效手段,一体化建模可以更精准地模拟实际受力特征,减小设计裕度。但这些研究未全面考虑疲劳载荷的影响和迭代设计的收敛性,未采用塔架和基础结构的工程设计规范,因此还无法直接应用于实际项目中。

结合项目建设与认证经验,符鹏程等^[22]对当前海上风电项目一体化设计难点进行分析,指出设计标准、建模一体化、工况设定与环境条件加载的一体化,以及动态载荷的整体提取4个方面必须做到统一,同时指出中标后的优化动力、技

术突破的主体责任、知识产权等问题仍然阻碍着一体化设计的真正落地。这是国内首次由第三方认证公司与业主单位提出一体化设计在项目实施中遇到的技术与机制的难点,但并未给出解决方案。此外,该研究也没有指出在实际工程项目中,当支撑结构的控制约束为适用频率的范围、泥面转角、结构径厚比等构造要素时,通过降载不一定能使结构减重。

3.2 结构优化技术

除了从降载角度进行突破外,从整体支撑结构建模及结构优化的角度进行减重也是很多学者的研究方向。翟恩地^[23]对海上风电一体化设计关键技术和解决方案进行了阐述,指出整机支撑结构频率、结构阻尼、抗冰设计、抗震设计、地基刚度等载荷计算的关键因素和塔架基础专业的创新是一体化设计的核心。这是国内首次站在实际工程角度提出一体化设计要同时从载荷、塔架与基础3个方面展开。曹春潼^[24]以某风电场单桩支撑结构设计为例,采用ABAQUS对风电机组-支撑结构-桩基础进行系统建模,对由风电机组、波浪载荷引起的疲劳损伤分别进行计算,最后进行线性累积。该研究实现了一体化建模和载荷计算,适用于波浪循环载荷在疲劳损伤中占比较小的项目,但无法适用于水深较深、波浪海况条件较复

杂的项目。

岩土与结构方向的研究人员针对桩土模型和基础设计提出了结构优化的可能性。田德等^[25]考虑基础柔性对机组载荷的影响,应用耦合弹簧模型建立桩土模型,采用有限元软件对基础结构进行优化,整体质量下降了7.41%,表明了桩土模型对载荷和结构质量的影响较大,设计中应予以考虑。林毅峰等^[26]对超单元迭代方法、常规迭代方法和一体化设计方法进行了对比,开展了风、浪、冰、地震等极端环境条件和正常发电工况下的基础结构一体化设计。以上研究虽然从结构和岩土设计的角度提出了固定式海上风电一体化设计的理念,围绕风电机组支撑结构与地基基础一体化设计分析进行了系统阐述,但仍缺少对风机控制策略与整体迭代优化设计的深入讨论。

在优化算法和设计效率方面,研究人员也不断做出改进。葛旭等^[27]在有限元分析的基础上,结合生物进化算法对海上三桩单立柱风机支撑结构主尺度参数进行多参数同步优化设计,优化效果明显。周映鸣等^[28-29]提出从全局最优设计的角度对塔架和基础同时进行优化,给出了海上风机一体化试验设计方法和流程,验证并指出基础顶载荷或塔架质量最小的方案不是塔架和单桩总质量最小的方案。图1给出了支撑结构一体化试验设

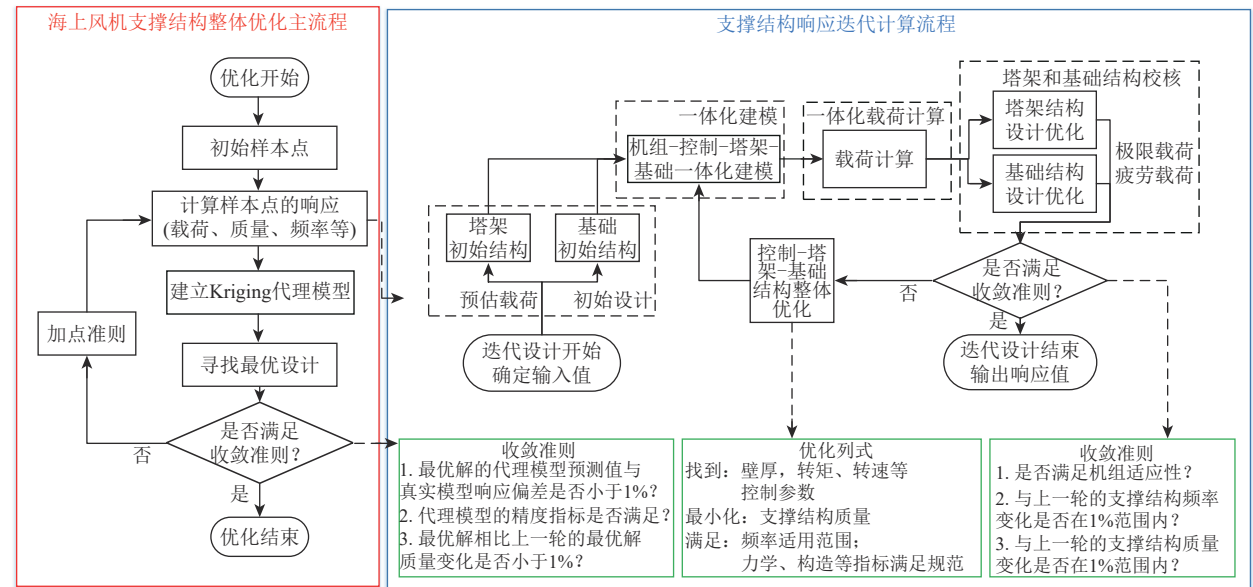


图1 支撑结构一体化试验设计方法

Fig.1 Integrated experimental design method of support structure

计方法，该方法通过试验选取多个不同构型的初始样本设计，同时考虑控制参数和结构壁厚参数优化，采用工程标准规范进行结构校核，获得的最优设计可以直接用于生产制造。该研究较为全面系统地提出了一体化设计方法，但对初始样本设计的选择经验、迭代设计的效率要求较高。

3.3 工程探索与应用

从以上研究可以看到，学术界对一体化设计的研究较为理想化，对模型也进行了简化，未采用行业标准进行设计，研究结果也未经测试验证，并且由于设计资质的因素，很难参与到实际工程项目中。工业界的主机厂、设计院都站在自身角度提出了可行的一体化设计技术，但由于知识产权保密、规范统一和优化动力等因素，还无法独自做到真正意义上的一体化设计。认证机构和业主单位的立场更为客观全面，但缺乏对技术的系统理解，也未给出可以实施的具体管理手段。因此，在当前国内的项目中很少有成功采用了一体化设计技术的工程示范。

从应用角度和第三方认可的角度来看，2019年，金风科技获得了DNV GL颁布的海上支撑结构一体化设计方法的符合性声明；2019年，中国海装申请的《高效安全海上风电机组关键技术及产业化》项目提出了机组-塔架-基础耦合作用下海上风电整机一体化设计方法，并获得了重庆市科学技术一等奖；2020年，鉴衡认证中心向华东勘测设计研究院颁发了海上风力发电机组-支撑结构台风下一体化设计评估符合证明。

然而，目前在国内工程项目中仍然经常存在以下现象：具有刚度突变的“塔架轻、基础重”设计；整体支撑结构频率下限由不合理的“载荷适用频率范围”控制的设计；除底段塔架外，均采用锥段，从而导致需通过加粗单桩直径来补偿频率的设计；因前期风、浪、流环境参数不完整而造成的设计保守；将大机组放置在水深较浅、地质较好的机位点，但损失了整场发电量的方案等。这些不合理的设计方案都造成了业主不必要的成本付出。因此，从降低海上风电LCoE的目标出发，一体化设计在项目实施落地过程中仍然有许多需要注意的措施和技术。

4 未来实施路径

一体化设计方法的实施路径如下：完整的环境勘测数据、放宽频率适用范围、分片区定制化设计是实施一体化设计的前提和共识；塔架和基础的并行优化、增强控制策略优化作用、创新的结构设计、先进的制造工艺是当前阶段已经具备技术成熟度、可直接采用的一体化设计技术；精细化桩土本构模型、制定风电行业统一的设计规范、开发协同设计软件平台是目前还不完全具备应用条件、今后需要进一步研究的方向。

4.1 实施前提及共识

4.1.1 完整的环境勘测数据

一年以上同一勘测点、同一时刻的完整风资源参数、水文环境与精细化岩土勘测数据是开展支撑结构优化设计的前提条件。只有具备完整的环境数据，设计人员才能采用精细化的环境参数处理技术(如考虑风浪异向作用，而不是简单极端载荷同向叠加、波浪凝聚等)进行载荷计算，避免人为增大安全系数以弥补环境数据不完备的顾虑。

4.1.2 放宽频率适用范围

是否可以放宽频率适用范围，需要通过主机厂家对机组各部件的适应性和安全性进行校核确认。频率适用范围的增大意味着设计约束的放松，这将更有利于寻找更优的设计。以单桩为例，如果频率适用下限更低，那么整体支撑结构将不易受到频率约束，而被迫通过加大桩径来提高刚度，导致需要增大厚度、满足径厚比，从而使结构质量加大。

4.1.3 分片区定制化设计

在海上风电支撑结构的设计中，基础结构是逐机位点进行设计的，但是风机的载荷计算和塔架设计有时采用的是全场包络设计。当整个场区的水深、地质条件差别很大时，如果仍然采用全场包络设计，将造成工程量的浪费。因此，对海上风电场采用合理的分片区定制化设计，既能降低工程造价，又能保证设计效率。

4.2 当前阶段可采用的技术

4.2.1 增强控制策略优化

基于高可靠性的机舱激光雷达、备用电源等

设备,采用独立变桨、塔架加阻、跳转速、分段停机控制、软切出等控制技术,可以实现推力减小、支撑结构设计载荷降低。控制策略优化是给定机组及大部件配置后保障结构安全性的最有效手段。

4.2.2 塔架与基础并行优化

提供多个初始结构构型(不同直径、根开等),建立海上风机、升压站等关键装备平台的风-浪-流-土动态耦合一体化结构模型,考虑载荷与结构的双向耦合影响,从寻找整体支撑结构最优设计角度对塔架和基础同步进行迭代优化,避免出现“轻塔架、重基础”“刚度不合理突变”等现象。

4.2.3 创新结构设计技术

当前已具备技术成熟度的创新结构包括:开孔位置(门洞、海缆孔等)采用局部加筋、变壁厚等新型结构形式,对塔架基础过渡段采用箱型梁结构,将门洞开孔设置在过渡段以降低轮毂中心高度等创新设计。这些技术都利于减小载荷、降低支撑结构造价。

4.2.4 先进的制造工艺

采用射钉、磁吸等免焊接工艺方式进行平台安装和附件连接,利用高精度切割工艺实现开孔位置的形状优化,以减少应力集中系数。这些技术也都可以减少材料用量,有利于整体成本的降低。

4.3 未来研究方向

4.3.1 精细化桩土本构模型

全面考虑在有无冲刷时、极限工况及长期循环荷载作用下,桩土相互作用对支撑结构频率的影响,精确评估大直径单桩桩土本构模型等技术,都可以更为精准地模拟风机支撑结构受到的载荷,为减少设计裕度奠定基础。

4.3.2 统一设计规范

海上风电行业采用的标准较多,风电机组设计主要采用IEC61400系列国际标准,塔架设计主要采用Eurocode、DIN系列标准,基础设计主要采用国内港工设计标准和部分行业标准,这些规范中对安全系数、径厚比的要求存在差异与重叠。因此,综合行业各参与方的技术和经验,针对海上风电整体支撑结构制定统一的设计标准十分必要。

4.3.3 一体化软件自主开发

在工程项目中实施多个方案的一体化设计,需要对整个设计流程实现自动快速迭代寻优,除了需要使用云服务之外,更重要的是在各设计方认可的前提下,提供具有知识产权保护的软件平台,开放更多设计变量,实现多变量、多目标的自动优化。

5 结论

通过介绍国内外海上风电支撑结构一体化设计方法的研究和应用情况,从提供一体化设计的前提条件、当前阶段可采用的技术、下一步的研究方向3个层次给出了实施路径。具体结论如下:

1) 一体化设计不仅是整体建模仿真,还要在统一的理论和标准下对尽可能多的变量进行设计,从寻找全局最优的角度对载荷、控制与结构同时进行优化,采用云平台及并行算法提升设计效率,采用创新的结构与工艺突破技术瓶颈。

2) 所提一体化设计方法的实施路径可实现降载减重效果,具备可操作性,满足主机厂、设计院等团体或行业标准要求。

3) 在海上风电走向平价开发的大背景下,业主工程师与第三方认证机构需要起到更大的推动作用。

参考文献

- [1] 李铮,郭小江,申旭辉,等.我国海上风电发展关键技术综述[J].发电技术,2022,43(2):186-197.
LI Z, GUO X J, SHEN X H, et al. Summary of technologies for the development of offshore wind power industry in China[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 186-197.
- [2] 朱家宁,张诗钊,葛维春,等.海上风电外送及电能输送技术综述[J].发电技术,2022,43(2):236-248.
ZHU J N, ZHANG S T, GE W C, et al. Overview of offshore wind power transmission and power transportation technology[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 236-248.
- [3] 孙瑞娟,梁军,王克文,等.海上风电集电系统研究综述[J].电力建设,2021,42(6):105-115.
SUN R J, LIANG J, WANG K W, et al. Overview of offshore wind power collection system[J]. Electric

- Power Construction, 2021, 42(6): 105-115.
- [4] 金国彬, 杨明城, 李国庆, 等. 考虑小干扰稳定的海上风电经不控整流直流送出系统控制器参数优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(21): 65-74.
- JIN G B, YANG M C, LI G Q, et al. Optimization design of controller parameters for an offshore wind power DC output system by diode rectifier considering small signal stability[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21): 65-74.
- [5] 国网能源研究院有限公司. 中国能源电力发展展望 2021[M]. 北京: 中国电力出版社, 2021: 89-108.
- State Grid Energy Research Institute Co., LTD.. China energy and electric outlook 2021[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2021: 89-108.
- [6] 李丽旻. 海上风机报价暴跌40%, 平价时代来了? [N/OL]. 中国能源报. (2021-10-24)[2022-01-16]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1714475197107011146&wfr=spider&for=pc>.
- LI L M. Offshore wind turbine quotes plunged by 40 %, parity era? [N/OL]. China Energy News. (2021-10-24) [2022-01-16]. <https://baijiahao.baidu.com/s?id=1714475197107011146&wfr=spider&for=pc>.
- [7] ZHANG L, ZHAO J, ZHANG X W, et al. Integrated fatigue load analysis of wave and wind for offshore wind turbine foundation[C]//International Offshore and Polar Engineering Conference. Beijing: ISOPE, 2010: 680-686.
- [8] MANUEL L, SAHASAKKUL W, NGUYEN H, et al. A review of coupling approaches for the dynamic analysis of bottom-supported offshore wind turbines[C]//Offshore Technology Conference. Houston, Texas, USA: OTC, 2016: 1-9.
- [9] GLISIC A, NGUYEN N D, SCHAUMANN P. Comparison of integrated and sequential design approaches for fatigue analysis of a jacket offshore wind turbine structure[C]//Proceedings of the 28th International Ocean and Polar Engineering Conference. Sapporo, Japan: ISOPE, 2018: 440-446.
- [10] VALK V D, PAUL L C, VOORMEEREN, et al. Dynamic models for load calculation procedures of offshore wind turbine support structures: overview, assessment, and outlook[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2015, 10(4): 13-27.
- [11] FISCHER T, VRIES W D, RAINEY R, et al. Offshore support structure optimization by means of integrated design and controls[J]. Wind Energy, 2012, 15(1): 99-117.
- [12] LOUKOGEORGAKI E, ANGELIDES D C, LLORENTE C. A numerical tool for the integrated analysis of fixed-bottom offshore wind turbines[C]//Proceedings of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference. Rhodes, France: ISOPE, 2012: 347-354.
- [13] HAGHI R, ASHURI T, VAN D, et al. Integrated multidisciplinary constrained optimization of offshore support structures[J]. Journal of Physics, 2014, 555: 1-10.
- [14] CHEW K H, MUSKULUS M, ZWICK D, et al. Structural optimization and parametric study of offshore wind turbine jacket substructure[C]//Proceedings of the 23rd International Offshore & Polar Engineering Conference. Anchorage, Alaska: ISOPE, 2013: 203-210.
- [15] ASHURI T, PONNURANGAM C, ZHANG J, et al. Integrated layout and support structure optimization for offshore wind farm design[J]. Journal of Physics Conference Series, 2016, 753(9): 1-13.
- [16] THEO G, WANG L, ATHANASIOS K. Integrated structural optimization of offshore wind turbine support structures based on finite element analysis and genetic algorithm[J]. Applied Energy, 2017, 199(8): 187-204.
- [17] 国际船舶网. DNV GL 提倡海上风电整机结构设计一体化[EB/OL]. (2014-07-03)[2022-01-16]. http://www.eworldship.com/html/2014/classification_society_0703/89307.html.
- [18] 赵向前, 黄松苗, 赵梓杭. 一体化理念在国内海上风电开发建设上的应用探究[J]. 南方能源建设, 2014, 1(1): 1-6.
- ZHAO X Q, HUANG S M, ZHAO Z H. Application study of integration concept in domestic offshore wind power construction[J]. Southern Energy, 2014, 1(1): 1-6.
- [19] 翟恩地, 张新刚, 李荣富. 海上风电机组塔架基础一体化设计[J]. 南方能源建设, 2018, 5(2): 1-7.
- ZHAI E D, ZHANG X G, LI R F. Integrated design of offshore wind tower and foundation[J]. Southern Energy Construction, 2018, 5(2): 1-7.
- [20] 吴俊辉, 刘作辉, 李力森, 等. 大型海上风力发电机组的载荷分析及载荷优化控制方法[J]. 电器工业, 2018(3): 69-71.
- WU J H, LIU Z H, LI L S, et al. Load analysis and load optimization control method of large-scale offshore wind turbine[J]. Electrical Appliance Industry, 2018(3): 69-71.
- [21] 王宇航, 唐浩渊, 邹亮, 等. 海上风电机组固定式支

- 撑结构环境敏感性分析及极限工况下的一体化设计[J]. 特种结构, 2020, 37(5): 1-6.
- WANG Y H, TANG H Y, ZOU L, et al. Environmental sensitivity analysis and integrated design of fixed support structure for offshore wind turbine under extreme operating conditions[J]. The Special Structure, 2020, 37(5): 1-6.
- [22] 符鹏程, 刘建平, 何凯华, 等. 海上风电项目“一体化设计”难点分析[J]. 风能, 2020(2): 68-69.
- FU P C, LIU J P, HE K H, et al. Analysis of difficulties in “integrated design” of offshore wind power projects[J]. Wind Energy, 2020(2): 68-69.
- [23] 中国机电工业杂志社. “千人计划”专家翟恩地: 技术驱动降低海上风电支撑结构成本[J]. 中国机电工业, 2018(1): 72-74.
- China Machinery & Electric Industry. Zhai Endi, expert of “Thousand Talents Plan”: technology-driven reduction of support structure cost of offshore wind power[J]. China Mechanical & Electrical Industry, 2018(1): 72-74.
- [24] 曹春潼. 海上风电机组单桩支撑结构和基础设计研究[J]. 机电设备, 2018, 35(6): 34-39.
- CAO C T. Offshore wind turbine support structure of the single pile and foundation design study[J]. Mechanical and Electrical Equipment, 2018, 35(6): 34-39.
- [25] 田德, 陈静, 罗涛, 等. 基于柔性基础模型的海上风电机组支撑结构优化[J]. 太阳能学报, 2019, 40(4): 1185-1192.
- TIAN D, CHEN J, LUO T, et al. Optimization of offshore wind turbine support structure based on flexible foundation models[J]. Acta Energiac Solaris Sinica, 2019, 40(4): 1185-1192.
- [26] 林毅峰, 李帅, 范可, 等. 海上风电机组支撑结构与基地基础一体化分析设计[M]. 机械工业出版社, 2020: 36-153.
- LIN Y F, LI S, FAN K, et al. Integrated analysis and design of offshore wind turbine support structure and base foundation[M]. China Machine Press, 2020: 136-153.
- [27] 葛旭, 徐业鹏, 黄丹. 基于进化策略的海上风电支撑结构多参数同步优化设计[J]. 可再生能源, 2020, 38(7): 900-904.
- GE X, XU Y P, HUANG D. Multi-parameter simultaneously optimal design of support structure for offshore wind turbine based on evolutionary strategy[J]. Renewable Energy Resources, 2020, 38(7): 900-904.
- [28] 周映鸣, 李晓勇, 陈晓庆. 海上风机支撑结构整体优化设计[J]. 南方能源建设, 2019, 6(4): 86-92.
- ZHOU Y M, LI X Y, CHEN X Q. Integrated design optimization of offshore support structure[J]. Southern Energy Construction, 2019, 6(4): 86-92.
- [29] 周映鸣, 闫姝, 姚中原. 海上风机塔架和单桩一体化试验设计方法[J]. 南方能源建设, 2021, 8(4): 16-25.
- ZHOU Y M, YAN S, YAO Z Y. Design of experiment for integrated offshore wind turbine tower and monopile[J]. Southern Energy Construction, 2021, 8(4): 16-25.

收稿日期: 2022-02-11。

作者简介:



周映鸣

周映鸣(1985), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为海上风电开发及设计, ym_zhou@qny.chng.com.cn。

(责任编辑 尚彩娟)