



“十三五”普通高等教育规划教材

Offshore Wind Turbine
Design and Development

海上风力发电机 设计开发

金风科技海上风电技术研究院 组 编

陈小海 张新刚 主 编

李荣富 李 晔 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

Offshore Wind Turbine
Design and Development

海上风力发电机 设计开发

金风科技海上风电技术研究院 组编

主 编 陈小海 张新刚
副主编 李荣富 李 晔
编 写 王婷婷 方建丰 李晓勇
冯延晖 邱颖宁 马春玲
丁 慧



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为海上风电从业人员培训系列教材之一。随着海上风力发电技术日益受到关注，海上风力发电机作为海上风能资源利用的主要设备，其开发设计受多种因素约束。本书从我国海上风能资源的分布状况出发，介绍了海上风机的发展现状与趋势、运行环境、总体设计要求，以及海上风电机组的设计开发、海上风机基础的设计开发、海上风机的整体设计、海上风机的拆除等内容。

本书是编者多年工程实践经验的总结，内容详实，详略得当，可作为高等职业院校新能源类专业教学用书，也可供相关工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

海上风力发电机设计开发/陈小海，张新刚主编；金风科技海上风电技术研究院编. —北京：中国电力出版社，2018.1

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5198-1332-1

I. ①海… II. ①陈… ②张… ③金… III. ①海上一风力发电机—发电机组—设计—高等学校—教材 IV. ①TM315.02

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 267622 号

出版发行：中国电力出版社

地 址：北京市东城区北京站西街 19 号（邮政编码 100005）

网 址：<http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑：王 娟（010-63412535）

责任校对：马 宁

装帧设计：赵姗姗

责任印制：吴 迪

印 刷：三河市百盛印装有限公司

版 次：2018 年 1 月第一版

印 次：2018 年 1 月北京第一次印刷

开 本：787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张：13.25

字 数：212 千字

定 价：46.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

海上风电从业人员培训系列教材

海上风电场开发概述

海上风电场经济性与风险评估

海上风力发电机设计开发

海上风电场施工建设

海上风力发电机组调试与维护

海上风电场项目管理



中国海岸线总长度约 32 000km，拥有发展海上风电的先天优势。中国东部沿海地区经济发达，且耗电量巨大，目前大部分用电都来源于煤炭发电，但是煤炭燃烧会释放大量二氧化碳，加剧全球变暖，而且有其他有害物质产生。国家对环境保护要求的提高，促使清洁能源快速发展，其中以海上风电的发展尤为迅猛。到 2018 年底，全球海上风电装机容量将增加 26 117MW，累计装机容量有望达到 32 948MW，占全球风电装机总容量的 6%。

中国沿海地区风能资源丰富、建设条件好、工业基础雄厚，完全具备开发建设海上风电的先决条件，虽然现在中国的海上风电还在摸索和小规模发展的阶段，但是随着国家的重视和产业自身的逐步成熟，中国海上风电终将迈向快速健康发展。

本书分为 8 个章节，全面介绍了海上风机的设计及开发，本书提到的海上风机包括海上风电机组和海上风机基础两大部分。

第 1 章的主要内容是中国海上风电的发展概况、海上风电面临的主要挑战以及主要任务。

第 2 章的主要内容是海上风机发展现状与趋势，主要介绍了国内外主要机型的特点。

第 3 章的主要内容是海上风机的运行环境，对海上风资源、海洋水文、海上的温度、盐雾和湿度，以及海洋地质等方面进行了分析。

第 4 章的主要内容是海上风机的总体设计要求，针对载荷设计工况的要求以及运输、安装、维护的要求进行了详细的说明。

第 5 章的主要内容是海上风电机组的设计开发，简单介绍了风电机组的基本结构、设计影响因素、基本要求以及结构设计，详细分析了风电机组的机械



系统设计、电气系统设计等。

第6章的主要内容是海上风机基础的设计开发，对海上风机基础的发展现状、主要基础型式、海上风机基础的设计以及选型等进行了详细的分析。

第7章的主要内容是海上风机的整体设计，主要介绍了传统风电机组与风机基础的设计流程和方法，以及风机一体化设计的流程和方法，通过对传统设计方法和一体化设计方法的对比分析了机组一体化设计的优势。

第8章的主要内容是海上风机的拆除设计，重点介绍了海上风机的拆除设计方法以及如何对海上风机拆除成本进行分析。

在本书的编写过程中，得到了金风科技众多技术部门领导和同事的大力支持，提出了宝贵的修改意见和建议；同时，本书的编写参阅了大量参考文献，在此一并表示衷心感谢。

限于编者水平，书中不妥之处诚请广大读者批评指正。

编者

2017年10月





前言

| | | |
|----------|---------------------|----|
| 1 | 概论 | 1 |
| 1.1 | 中国海上风电发展概况 | 3 |
| 1.2 | 发展海上风电面临的主要挑战 | 4 |
| 1.3 | 发展海上风电的主要任务 | 5 |
| 2 | 海上风机发展现状与趋势 | 7 |
| 2.1 | 海上风机发展现状 | 9 |
| 2.2 | 海上风机发展趋势 | 18 |
| 3 | 海上风机运行环境 | 21 |
| 3.1 | 海上风资源 | 23 |
| 3.2 | 海洋水文因素 | 24 |
| 3.3 | 海洋地质因素 | 26 |
| 4 | 海上风机总体设计要求 | 29 |
| 4.1 | 设计载荷工况要求 | 31 |
| 4.2 | 运输、安装、维护要求 | 34 |
| 5 | 海上风电机组设计开发 | 39 |
| 5.1 | 风电机组的基本结构 | 41 |

| | | |
|----------|-------------------------|------------|
| 5.2 | 海上风电机组面临的设计问题 | 45 |
| 5.3 | 风电机组的基本要求 | 45 |
| 5.4 | 海上风电机组设计的影响因素 | 47 |
| 5.5 | 风电机组的结构设计 | 51 |
| 5.6 | 风电机组的系统设计 | 61 |
| 5.7 | 海上风电机组的机械系统设计 | 70 |
| 5.8 | 海上风电机组的电气系统设计 | 85 |
| 6 | 海上风机基础设计开发 | 105 |
| 6.1 | 海上风机基础的发展现状 | 107 |
| 6.2 | 海上风机基础的结构型式 | 108 |
| 6.3 | 海上风机基础的防护设计 | 137 |
| 6.4 | 海上基础选型及设计 | 142 |
| 7 | 海上风机整体设计 | 155 |
| 7.1 | 传统风机与基础的设计流程和方法 | 157 |
| 7.2 | 一体化设计 | 157 |
| 7.3 | 传统设计方法与一体化设计方法的对比 | 165 |
| 8 | 海上风机的拆除 | 169 |
| 8.1 | 海上风机拆除现状 | 171 |
| 8.2 | 海上风电场的拆除设计 | 176 |
| 8.3 | 海上风机拆除成本分析 | 183 |
| 附录 A | 尾流控制设计 | 188 |
| 附录 B | 生态环境对海上风机设计的影响 | 194 |
| 附录 C | 江苏省环境保护案例分析 | 199 |
| 参考文献 | | 201 |



1

概 论



1.1 中国海上风电发展概况

1. 中国海洋风能资源的储量和分布情况

中国东部沿海地区冬、春季受北方冷空气影响,夏、秋季受热带气旋影响,海上风能资源较为丰富;福建、广东沿海地区风能资源优于东部沿海,但是台风较多,福建沿海尤为突出。总的来说,水深 5~25m,高度 50m 风能可利用量约为 2 亿 kW;水深 5~50m,高度 70m,风能可利用量约为 5 亿 kW;此外,深海风能资源尤为丰富。

2. 海上风电开发建设已趋于成熟

2007 年金风科技在中海油渤海湾钻井平台安装 1.5MW 实验机组,为中国海上风电拉开了序幕。截至 2016 年 1 月,我国海上风电场已投产约 75 万 kW,主要包括上海东海大桥海上风电示范项目(102MW),江苏如东潮间带实验风电场(32.5MW),江苏如东潮间带示范风电场(200MW),江苏响水近海风电场(200MW),江苏如东近海风电场(150MW)。

3. 海上风电机组大型化趋势明显

目前中国国内已经具备生产制造 5MW 以上大容量风电机组的能力,金风科技股份有限公司(简称金风科技)、国电联合动力技术有限公司(简称国电联合动力)、中国明阳风电集团有限公司(简称明阳)、远景能源科技有限公司(简称远景能源)、华锐风电科技(集团)股份有限公司(简称华锐)、上海电气集团股份有限公司(简称上海电气)、中船重工(重庆)海装风电设备有限公司(简称海装)、湘电风能有限公司(简称湘电)、三一电气有限公司(简称三一电气)等企业均已有海上风电样机安装业绩。

4. 专业施工团队有序发展

在施工方面,江苏龙源振华海洋工程有限公司(简称龙源振华)、中交第三航务工程局有限公司(简称中交三航局)、华电重工股份有限公司(简称华电重工)、南通市海洋水建工程有限公司(简称南通海洋水建)和中铁大桥局集团有限公司(简称中铁大桥局)等承担了海上风电的施工作业,均具有实际的海上风电施工经验;中国海洋石油有限公司(简称中海油)、江苏省电力建设工程集团有限公司(简称江苏电建)、天津港航工程有限公司

(简称天津港航)、上海电力建设有限责任公司(简称上海电建)、上海国际港务(集团)股份有限公司(简称上海港务)、中国水利水电第八工程局有限公司(简称水电八局)、三一重工股份有限公司(简称三一重工)、中国葛洲坝集团公司(简称葛洲坝)、江苏道达海洋重工股份有限公司(简称道达重工)等单位在海上施工作业都有大量的技术积累,有能力进行海上风电的施工。

在地质水文勘测方面,中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司(简称华东院)、上海勘测设计研究院有限公司(简称上海院)、广东省水利水电勘测设计研究院(简称广东院)、福建省水利水电勘测设计研究院(简称福建院)和中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司(简称西北院),从项目规划到设计、施工,已形成了专业的技术团队,同时也在积极推进标准制定。

在开发建设方面,五大电力企业(中国华能集团公司、中国大唐集团公司、中国华电集团公司、中国国电集团公司以及中国电力投资集团公司)和中国长江三峡集团公司(简称三峡集团)、中国广东核电集团有限公司(简称中广核)、中国神华能源股份有限公司国华电力分公司(简称国华电力)、河北建设集团有限公司(简称河北建设)、鲁能集团有限公司(简称鲁能)、广东省粤电集团有限公司(简称粤电)等能源投资企业,积极投身国内海上风电场开发建设,并已取得显著业绩。

5. 海上风电标准体系逐步建立

《海上风电开发建设管理暂行办法》、《海上风电开发建设管理实施细则》已逐步由国家能源局制定并出台。海上风电规划、预可研、可研、风能资源测量及海洋水文观测、地质勘查、施工组织设计、钢结构防腐、概算定额、概算编制规定、变流器等技术标准也在落实中。

6. 海上风电电价调整

由发改委 2014 年下发的《关于海上风电上网电价政策的通知》,明确了海上风电的临时电价,为投资方带来了信心,极大地推进了海上风电开发进程。

1.2 发展海上风电面临的主要挑战

1. 项目审批流程复杂

海上风电项目开发涉及多个领域,需要不同部门的逐个审批。但各部门对

海上风电认识不一，管理标准不同，造成审批缓慢。目前海上风电项目通过海洋环境评估、同行安全论证的周期一般为两年以上。

2. 技术标准体系不够完善

海上风电起步较晚，至今还未形成完善的标准体系。在工程勘察、施工、安装、运维管理等方面缺乏技术标准，导致项目实践缺乏有效指导，增加了技术和成本风险。

海上风电工程复杂，运行环境恶劣，施工难度大，技术要求高。我国5MW和6MW级的大容量机组在制造方面还处于少量试运行阶段，海上施工设备还不能适应多种建设条件，对海上风电基础的设计、施工研究经验不足。离岸变电站和海底电缆技术等级也较低。

1.3 发展海上风电的主要任务

1. 加强基础设施建设，加快推进海上风电前期工作

应全面系统开展海上风能资源评价、海洋水文观测和海底地质勘查工作。各沿海省份能源主管部门应积极落实已批复的海上风电规划。国家能源局协调海洋、海事部门，提出一批重点推进项目清单。

2. 政府需大力支持海上风电发展

国家层面的海洋、海事等部门需要加强沟通，统一对发展海上风电重要性的认识，在审批流程和管理环节上进一步完善和简化，提高海上风电的行政管理效率，促进海上风电发展。

3. 积极推进海上风电产业体系建设

依托重点示范项目，突破总体方案设计、大功率风机研制、基础设计、施工安装等方面的技术问题，此外还要积极探索深海海上风电技术。

技术单位和开发企业在工程开发建设过程中，需要不断积累和总结实践经验，以供后续项目参考。

4. 做好审批权下放后事中事后监管工作

我国海上风电还处于发展初期，各方面还不成熟，需要政府、企业等的共同努力，推进海上风电健康发展。风电项目审批权下放到地方后，还需要国家的宏观引导和协调，更需要在项目建设运行过程中的监管。

海上风机发展现状与趋势



2.1 海上风机发展现状

风力发电机（简称风机）无法单独工作，必须和风轮一起构成风力发电机组。风力发电机组（简称机组）包括风轮、发电机。风轮中含叶片、轮毂、加固件等。叶片受风力旋转带动发电机发出电能。

2.1.1 海上机组与陆上机组的比较

随着陆上风力发电技术的日益成熟及陆地上的有限风能相继开发，人们将目光转向丰富的海上风能资源，考虑建设海上风电场。海上风速比陆上风速高，但海上风电场点电网连接成本较高。海上风机与陆上风机的区别主要体现在：海上风机基础设施建设难度高，各部件载荷比陆上风机强度大，需要采用特殊安全等级。

1. 设计载荷工况的差异

从设计载荷工况看，陆上机组设计中规定载荷工况应包括正常载荷工况、极端载荷工况、特殊载荷工况（停机和故障状态）及运输载荷工况。与陆上机组相同，海上机组也包括正常载荷工况、极端载荷工况、特殊载荷工况及运输载荷工况。二者不同之处在于，海上机组在陆上机组载荷工况基础上多加了海上特定的波浪工况载荷，因此，设计载荷工况除重点考虑极端载荷工况 E1.0、E1.1、E1.2、E2.0、E2.1 和 S1.1～S1.4 外（工况 E1.0、E1.1、E1.2、E2.0、E2.1 和 S1.1～S1.4 的详细说明见表 4-2 和表 4-3），还需要特别分析计算波浪载荷对机组整体性能的影响。设计时应重点考虑机组的疲劳载荷，同时还要根据机组波浪载荷变化引起的载荷突增和突减的情况，进行计算对比和设计对比，在保证机组的可靠性及使用寿命基础上，寻求最优结构设计。

2. 运行环境的差异

海上风湍流强度小，具有稳定的主风向，疲劳载荷较低，风机寿命长，单机容量更大（3～5MW），年利用小时数更高；海面粗糙度较陆上小，风切变小，因而塔架可以较短；海上风电开发受噪声、景观、鸟类、电磁波干扰的限制少；海上风电场开发不涉及土地征用问题，更适合陆地面积较小、临海的地区；海上风电不会引起大气污染或产生任何有害物质，环保价值可观。但是，海上风电的技术难度大，建设成本一般是陆上的 2～3 倍。