



“十三五”普通高等教育规划教材

Offshore Wind Farms
Construction

海上风电场 施工建设

金风科技海上风电技术研究院 组 编

陈小海 张新刚 主 编

张 竹 冯延晖 副主编

海上风电



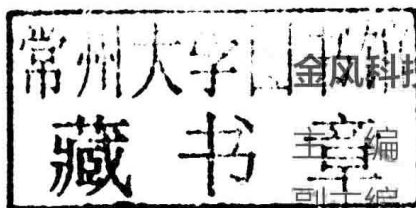
中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

Offshore Wind Farms
Construction

海上风电场 施工建设



金风科技海上风电技术研究院 组编

主编
副主编

陈小海 张新刚

张 竹 冯延晖

编 写 陈金龙 滕华灯 沈星星

俞雪梅 葛中原 马春玲

邱颖宁 丁 慧



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书介绍了海上风电场施工建设的基础知识和技术,分析了建设海上风电场的总体设计流程,重点剖析了海上风电场建设的施工关键技术。针对海上风电机组常见的盐雾腐蚀、台风破坏等自然环境影响,提出了解决思路和措施,具体分析了基础的设计形式和风机部件安装施工的方法,对比了各种不同的施工方式所对应的风电场施工建设方法,提出了安装船的选型、升压站的设计及机组接线质量控制的系统解决方案,强调了施工安全管理的重要性,详细介绍了海上风电场建设的进度影响因素及施工成本评估。

本书可作为从事海上风电相关工作的工程设计人员和施工安装技术人员的培训教材,也适合作为高等院校相关专业通用教材,对关注海上风电场建设的读者,也是一本很好的科普读物。

图书在版编目(CIP)数据

海上风电场施工建设/陈小海,张新刚主编;金风科技海上风电技术研究院组编.
—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 978-7-5198-1211-9

I. ①海… II. ①陈… ②张… ③金… III. ①海上一风力发电—发电厂—工程施工—高等学校—教材 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第240698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:闫秀英

装帧设计:王英磊 赵姗姗

责任印制:邹树群

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:710毫米×980毫米 16开本

印 张:13.75

字 数:212千字

定 价:48.00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

随着风力发电机技术的发展,单机容量逐步加大,机组可靠性进一步提高,大型海上风电场的建设也拉开了序幕。我国海洋面积辽阔,海上风能资源丰富,可利用的风资源多,加之我国政府出台了大量优惠措施支持海上风电的发展,各大电力公司纷纷规划建设大型海上风电场,同时各大风力发电设备供应商也积极研发大功率的风力发电机组来推动海上风电事业的发展。

然而,海上风电建设具有海况多、地址复杂的特点,施工难度大。海上风电施工受到气候、天气、潮汐等多方面影响,施工周期相对陆上风电场更长,工况也更为复杂。我国海上风电建设尚处在初期,技术能力比较薄弱,海上风电技术相关图书缺乏成为限制海上风电发展的因素之一。因此,金风科技公司联同部分高校,在研究海上风力发电技术和实施海上风力发电项目的基础上,编写了本套书,以期对海上风电施工和发展提供助力,为从事海上风电开发的工程技术人员和施工人员提供参考资料。

本书分为9章,全面介绍了海上风电场施工建设。

第1章为海上风电场开发可行性研究,主要对海上风能资源、海上风电场开发制约因素、海上风电场选址原则及风电场评估进行了介绍。

第2章主要讲述了海上风电场建设流程。从风电场设计、环境影响、能效产出、施工、运营和维护等各方面,归纳出海上风电场建设流程图及施工准

备,给出了新建海上风电场的前期准备工作、施工进度计划、安全文明施工要素以及海上运输安装、升压站的施工方案,为我国海上风电场建设提供了总体设计和流程。

第3章主要介绍海上风电场输变电系统设计及施工技术,主要概述了海上风电场各台风力发电机组发出的电能,经汇集并通过变电设备升压之后,把电能并入电网,这个流程的电气供电系统设计和施工技术,汇总了海上风电场输变电形式、输变电方式,针对海底电缆(简称海缆)的选型和铺设方式以及海缆铺设装备、海上升压站设计与建设做了详细介绍,并对海上风电场海缆输电系统建设进行了成本评估。

第4章是介绍海上风机基础的施工技术,主要分析了海上风电场环境及地质条件、风力发电机容量以及施工安装资源情况的复杂多变,海上风力发电机组基础结构也各式各样,因此针对各类基础的结构特点和适用的水深范围不同、施工工艺不同,进行了详细介绍。

第5章是针对海上风力发电机组安装施工技术的概述。针对风电机组不同的安装方式,分别介绍了单叶式、兔耳式、三叶式施工技术,并对比分析了不同形式的优缺点和应用,为海上风电机组的安装施工提供参考。

第6章主要介绍了海上风电机组安装船。海上风电机组安装船是建设海上风电场的关键设备,后期大型维护都需要海上施工船舶进行作业。通过对比分析不同形式的海上风电机组安装船,可以了解现有海上风电机组安装船舶的关键技术参数及使用情况。

第7章主要介绍海上风电机组天气窗口和施工进度的影响因素,海上风电场的施工建设和运营都受到海况和风况的时时影响,海上风电场施工所需的天气窗口也比较复杂。因此,了解天气作业窗口对海上风电场的施工和维护均非常关键。本章介绍了如何利用最佳的作业天气窗口提高施工进度的措施和方法。



第8章主要讲述海上风电场施工安全管理。海上施工作业属于高风险的工作，由于环境特殊，安全生产问题尤为突出。本章通过分析海上作业的特点、海上施工要求、风险分析以及危险源辨识，建立了相应的应急预案和措施以及事故汇报制度、事故后处理事项，以降低和减少海上施工作业的风险，确保工程的安全生产。

第9章主要介绍了海上风电场施工安装成本评估方法。通过建立施工安装成本评估模型，可对未建设的海上风电场施工安装成本进行预估，以供开发商参考，降低成本。由于国内缺乏海上实际项目的经验，整个系统模型还不完善，估计成本与现实成本存在一定的差别。随着国内更多海上风电项目的建设，这些安装经验校正模型，可减少预估成本与现实成本的差距。

在本书的编写过程中，得到了金风科技海上风电场研发专家的大力支持，提出了宝贵的修改意见和建议，在此表示感谢。

本书的编写参阅了大量参考文献，在此对其作者一并致谢。

限于作者水平，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	海上风电场开发可行性研究	1
1.1	海上风资源	3
1.2	海上风电场开发制约因素	3
1.3	海上风电场选址	7
1.4	海上风电场评估	8
1.4.1	环境影响评估	8
1.4.2	风电场能效产出评估	9
2	海上风电场建设概述	13
2.1	海上风电场的构成	15
2.2	海上风电场建设流程	15
2.2.1	施工计划拟订及施工准备	15
2.2.2	海上升压站施工	17
2.2.3	海上风力发电机组基础施工	18
2.2.4	海缆铺设	19
2.2.5	海上风力发电机组码头拼装及海上运输	20
2.2.6	海上风力发电机组吊装	21

2.2.7 海上风力发电机组调试及并网	22
---------------------------	----

3 海上风电场输变电系统设计及施工

3.1 海上风电场输变电系统

3.1.1 海上风电场输变电系统的组成	29
---------------------------	----

3.1.2 海上风电场输变电系统的分类及优缺点	29
-------------------------------	----

3.2 海上风电场海缆铺设

3.2.1 海缆及海缆附件的选择	33
------------------------	----

3.2.2 海缆铺设施工装备	37
----------------------	----

3.2.3 海缆铺设施工技术	42
----------------------	----

3.3 海上升压站建设

3.3.1 海上升压站概述	51
---------------------	----

3.3.2 海上升压站的设计与应用	52
-------------------------	----

3.3.3 海上升压站的布置类型	56
------------------------	----

3.3.4 海上升压站结构形式施工设备	58
---------------------------	----

3.3.5 典型海上升压站施工工艺	59
-------------------------	----

3.4 陆上升压站

3.4.1 陆上升压站的分类	64
----------------------	----

3.4.2 陆上升压站与海上升压站的比较	64
----------------------------	----

4 海上风力发电机组基础施工

4.1 单桩基础

4.1.1 单桩基础施工流程	70
----------------------	----

4.1.2 单桩基础施工的优缺点	76
------------------------	----

4.2 多桩基础

4.3 多桩承台基础	79
4.3.1 多桩承台基础施工工艺	80
4.3.2 多桩承台基础的优缺点	81
4.4 导管架式基础	82
4.4.1 导管架式基础安装施工方式	82
4.4.2 导管架式基础施工方案的优缺点及适用范围	83
4.4.3 典型应用案例	83
4.5 重力式基础	83
4.5.1 重力式基础施工工艺	84
4.5.2 重力式基础的优缺点及适用范围	84
4.6 浮式基础	85
4.7 桶式基础	87
5 海上风力发电机组安装施工	91
5.1 海上风力发电机组的结构	93
5.2 单叶式安装施工	93
5.3 兔耳式安装施工	98
5.4 三叶式安装施工	100
5.4.1 三叶式机组安装方式	101
5.4.2 典型案例	104
5.5 各种吊装方式的优点和缺点	104
6 海上风力发电机组专业安装船	107
6.1 海上风力发电机组安装船的现状与发展趋势	109
6.1.1 风力发电机组安装船概述	109
6.1.2 风力发电机组安装船发展历程与趋势	110

6.1.3 国内及国外发展现状	113
6.2 风力发电机组安装船的分类	116
6.2.1 起重船	117
6.2.2 非自航自升式安装平台	118
6.2.3 自航自升式安装船	120
6.2.4 平板驳船	122
6.2.5 其他安装船	123
6.3 风力发电机组安装船的关键技术及参数	124
6.3.1 风力发电机组安装船的关键技术	124
6.3.2 风力发电机组安装船的关键参数	127
6.4 风力发电机组安装船选择举例	132
6.5 安装案例分析	133
6.6 总结	135
7 海上风力发电机组天气窗口和施工进度	137
7.1 天气窗口	139
7.1.1 风	139
7.1.2 海浪	140
7.1.3 潮水	140
7.1.4 台风	142
7.1.5 雨水(特殊天气)	142
7.1.6 海冰	142
7.1.7 海雾	143
7.2 海上风电场施工进度的影响因素	143
7.3 相关案例及改善方法	144
8 海上风电场施工安全管理	147
8.1 海上施工的难度和风险的特点	149
8.2 第三方施工监理制度	149
8.2.1 在项目的实施阶段监理组织管理和协调的重要性和必要性	150

8.2.2	施工过程中的监理的质量控制	150
8.3	海上作业施工组织辅助需求	152
8.3.1	天气预报	152
8.3.2	医疗救治	153
8.3.3	后勤管理	154
8.4	作业许可制度	154
8.4.1	适用范围	154
8.4.2	安全检查制度	155
8.5	海上施工船舶检查	156
8.5.1	船舶安全检查制度	156
8.5.2	施工前船检	156
8.5.3	船只安全设施检查	158
8.6	海上施工要求	160
8.7	风险分析	161
8.7.1	风险分析与方法确定	161
8.7.2	确定初始风险等级	161
8.7.3	确定控制措施和残余风险等级	162
8.7.4	风险分析结论	163
8.8	危险源辨识	163
8.9	应急预案和措施	166
8.9.1	应急组织及职责	166
8.9.2	应急报警	167
8.9.3	大风应急预案	167
8.9.4	台风应急预案	168
8.10	事故汇报制度及事故后处理	170
8.10.1	事故汇报制度	170
8.10.2	事故后处理	171

9	海上风电场施工安装成本评估方法	173
----------	------------------------------	------------

9.1	国内外海上风电场施工安装成本	175
9.1.1	欧洲海上风电场施工安装成本	175
9.1.2	国内海上风电场施工安装成本	176
9.2	海上风电场施工安装成本评估模型介绍	178
9.2.1	模型描述	178
9.2.2	可变因素	178
9.2.3	不可变因素	178
9.2.4	模型中间变量	178
9.2.5	模型输出	179
9.3	项目输入数据	179
9.3.1	海上风电场特征	179
9.3.2	船舶类型选择	180
9.3.3	基础类型选择	180
9.3.4	运输策略	180
9.3.5	安装策略	181
9.3.6	校正因子	181
9.4	系统数据	181
9.4.1	船舶参数	181
9.4.2	预期安装作业时间	182
9.4.3	预期船舶日成本	182
9.5	安装阶段的相关计算	182
9.5.1	基础安装	182
9.5.2	风力发电机组安装	185
9.5.3	海缆安装铺设	185
9.5.4	海上升压站安装	186
9.6	模型参数	187
9.6.1	船舶参数	187
9.6.2	基础	188
9.6.3	风力发电机组	188
9.6.4	海缆	189

9.6.5 海上升压站	190
9.7 案例分析	190
9.7.1 案例对象	190
9.7.2 项目输入数据	190
9.7.3 系统输入数据	191
9.7.4 基础安装成本	191
9.7.5 风力发电机组安装成本	191
9.7.6 电缆安装成本	192
9.7.7 升压站安装成本	192
9.7.8 整个风电场安装总成本	192
9.8 总结	192
附录	193
附录 A 动火作业申请单	193
附录 B 吊装作业申请单	194
附录 C 临时电线安装申请单	195
附录 D 船舶救生安全检查表（现场用）	196
附录 E 海上船舶综合安全检查表	197
附录 F 海上船舶综合安全检查表（续表）不符合项整改单	198
参考文献	199



海上风电场开发可行性研究





近年来,风能作为可再生清洁能源已逐渐成为我国能源结构中重要的组成部分,但由于北部地区弃风限电,风电市场逐渐呈现出向南发展的趋势。海上风电场临近东南沿海经济发达地区,同时经过近 10 年的海上风电建设摸索,人们对海上风资源、海上风电技术的认识越来越深入,风电开发商们纷纷将目光投向起步中的海上风电。

在海上风电场建设开始之前,首先要进行完善的可行性分析、评估,在控制成本与风险的基础上,使海上风电场的开发朝着健康有序的方向持续前行。

1.1 海上风资源

一般而言,海上风资源情况优于陆地,离岸 10km 海域范围的风速通常比沿岸陆上高约 25%。同时,海上风资源比较稳定,静风期较少,可以持续有效地利用风能。一般估计,若海上风速比陆上风速平均高约 20%,发电量可增加约 70%。此外,海上风能比陆上风能质量更高,主要表现在陆地表面凹凸不平,地形对风力、风向、风量等有很大影响,容易出现紊流,对风轮叶片破坏力极大,甚至可能导致叶片振动、疲劳、断裂等严重后果。而海洋上海面平坦、风情稳定,没有复杂地形对气流造成的影响,湍流强度低,大大降低了风电机组的疲劳载荷,有利于保证机组使用寿命。

由于海面的粗糙度比陆地上小得多,海上风切变即风速随着高度降低而变化的幅度小,可在较低的高度获得较大的风速,因此支撑风力发电机的塔筒不必太高,相应的支撑结构造价、安装维护费用可以减少。但是,海面的粗糙度也是不稳定的,主要影响因素是实时波浪的大小,而风与波浪之间的相互作用会受风速、水深、离岸距离等因素的影响。

1.2 海上风电场开发制约因素

尽管海上风能与陆地相比,具有更显著的优点,但在进行海上风电场开发时,需要考虑自然条件、海域条件、政策条件等各个因素的制约。

1. 自然条件

(1) 风资源特性。在风电场全生命周期中,需要足够的风资源来转化为能