

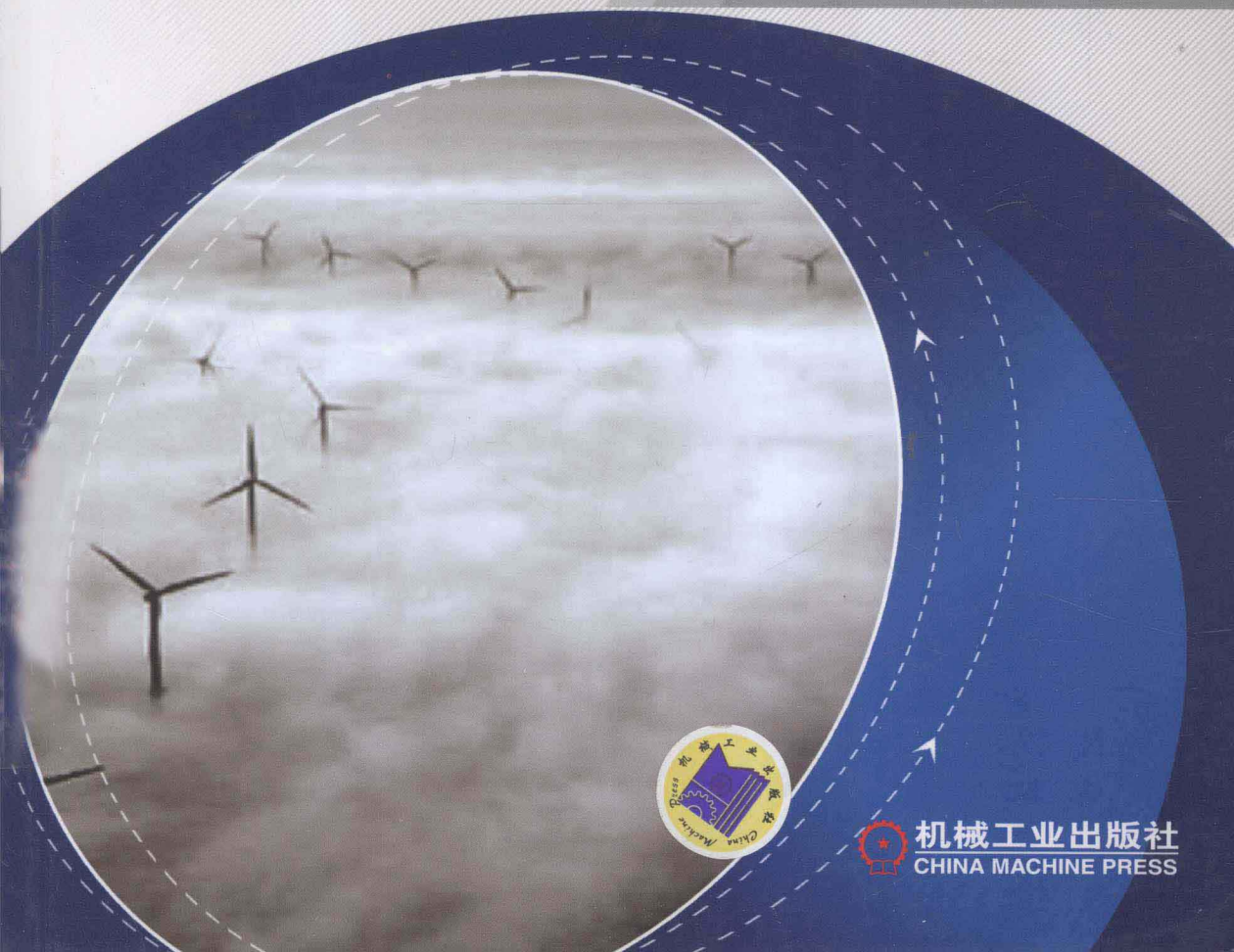
“十二五”国家重点图书出版规划项目

海上

# 风力发电技术

Offshore Wind Energy Generation Technology

王志新○编著



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

“十二五” 国家重点图书出版规划项目

# 海上风力发电技术

Offshore Wind Energy Generation Technology

王志新 编著



机械工业出版社

本书涉及海上风电机组及海上风电柔性直流输电关键技术,反映了国内外海上风电技术发展态势、最新研究成果和工程应用情况。全书共8章,包括海上风资源勘测与风电场发电量预测技术、海上风电机组基础技术、海上风电机组安装、海上风电机组系统设计技术、海上风电场变电站电气设计技术、海上风电场柔性直流输电变压器技术、海上风电场电力输送技术等内容。

本书适合作为高等学校风力发电、电气工程与自动化、机械工程、过程控制、自动化等专业的本科生、研究生的教材,以及高等学校教师、研究院(所)从事设计和工程的技术人员及管理干部,风电设备制造企业及相关产业的技术和管理人员,风电公司技术人员、科技及运营管理人员等参考用书。

## 图书在版编目(CIP)数据

海上风力发电技术/王志新编著. —北京:机械工业出版社, 2012.10

“十二五”国家重点图书出版规划项目

ISBN 978-7-111-39812-7

I. ①海… II. ①王… III. ①海上-风力发电-技术 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第227700号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:刘星宁 责任编辑:刘星宁 版式设计:霍永明

责任校对:刘岚 封面设计:陈沛 责任印制:张楠

北京四季青印刷厂印刷

2013年1月第1版第1次印刷

169mm×239mm·12.25印张·234千字

0001—3000册

标准书号:ISBN 978-7-111-39812-7

定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066 教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售一部:(010) 68326294 机工官网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 机工官博:<http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线:(010) 88379203 封面防伪标均为盗版

# 前 言

全球风电发展迅速，海上风电已成为风电发展的重要领域，也是近年来新兴的海上开发利用产业。海上风电相对陆上风电具有以下特点，即资源丰富、风能资源非常稳定、发电利用小时数高、不占用土地、对生态环境影响小、不消耗水资源和适宜大规模开发等，且一般靠近传统电力负荷中心，便于电网消纳，免去了长距离输电的问题。因此，英国、德国、爱尔兰、丹麦、比利时、荷兰、瑞典等欧洲国家都纷纷加快了海上风电的开发力度。另一方面，相对于陆上风电，海上风电面临浮冰、台风、盐雾等复杂的自然条件，对海上风电机组技术要求更高，海上风电场建设难度更大、成本更高、建设环境更复杂。例如，欧洲某知名风电机组生产厂商的2MW海上风电机组运行了一段时间后，有一批风力发电机出现了绝缘故障，被迫进行维修更换。除了技术因素外，海上风电开发还要考虑电缆铺设、船舶航运、滩涂围垦以及珍稀禽类保护等多方面的因素。例如：出于保护沿海浅滩区生态和避免影响旅游业的考虑，德国政府曾要求海上风电场至少距离海岸30km。例如，阿尔法·文图斯海上风电场离海岸超过40km，由于建设地点离岸远、水深、风电机组尺寸大等因素，最终造成该项目耗资大大超过预算，达到2.5亿欧元，每千瓦造价超过3.5万元人民币。

面对海上风电广阔的发展前景，全球风电机组制造企业也纷纷加大海上大型风电机组研发和产业化力度。目前，已经能够在海上风电场批量应用的海上风电机组主要有法国Areva Multibrid公司的5MW半直驱风电机组、德国REpower公司的5MW风电机组、丹麦Vestas公司的2MW和3MW双馈异步风电机组、德国西门子公司的2.3MW和3.6MW风电机组、德国Bard公司的5MW风电机组、芬兰WinWind公司的3MW半直驱风电机组等。GE公司计划研发的新一代10~15MW级大容量风电机组，采用GE磁共振成像系统超导体磁体技术，淘汰了变速箱，由于超导线圈能够产生强磁场，超导发电机的转矩密度是常规发电机的两倍，因此，降低了对稀土的依赖，减少了发电机中铁的使用量，减轻了发电机的重量。

我国于2007年在渤海辽东湾南部海域、距海岸约46 km处安装了首台1.5 MW直驱机组，通过约5 km长的海底电缆将电力输送至绥中36-1油田独立电网，与4台双燃料透平机组组成互补系统。位于上海临港新城至洋山深水港的东海大桥102MW近海风电场采用34台3MW双馈机组，已于2010年全部建成并成功并网发电。我国已具备设计制造大型海上风电机组的能力，2011年10月在江苏省射阳县临港产业区完成了首台6MW大型海上风电机组吊装。国家科学技术部制定《风力发电科技发展“十二五”专项规划》，明确未来的重点任务涉及基

基础研究类、研究开发类等7个层面,其中,对风电机组整机关键技术研究开发包括“10MW级风电机组总体设计技术”、“3MW到5MW永磁直驱风电机组产业化技术”和“7MW级风电机组研制及产业化技术”。大容量风电机组相关技术研究已成为我国风电产业科技创新的重点,国家拟通过“863计划”重点资助研发10MW大型海上风电机组,计划采用永磁直驱、双馈或超导技术。该规划还明确特大型风电场建设将成为我国风电开发的需求重点,“十二五”期间,我国将规划建设6个陆上和2个海上及沿海风电基地。

1990年丹麦安装了第一台单机容量为220kW的近海示范风电机组,2011年底全球已建成80个海上风电场,累计装机容量达到4954MW。2012年,英国的瓦尔内海上风电场二期并网发电,成为世界上最大的海上风电场,总装机容量达到367MW。预计2015年、2020年,全球海上风电装机容量将分别达到26GW、70GW。我国海上风电产业将重点开发建设江苏、山东基地,推进河北、上海、浙江、福建、广东、广西、海南等地海上风电建设。上海、江苏、浙江、山东、福建5省市的海上风电规划装机规模为10.1GW,其中,近海5.9GW、潮间带4.2GW。到2020年,以上5省市海上风电装机规模预计将达到22.8GW,其中,近海11.7GW、潮间带5.1GW。截至2011年底,我国海上风电(包含潮间带)累计装机容量为241.3MW,规划到2015年、2020年海上风电装机容量分别达到5GW、30GW。

随着国内外海上风电的迅速发展,对于海上风力发电技术书籍的需求量巨大,但至今国内外未见有类似综合介绍海上风力发电技术的书籍出版,难以满足工业界和学术界的需要。因此,及时组织编写本书是及时和必要的,具有极大的市场需求和重要意义。

本书共8章,由上海交通大学王志新教授编著完成,系统总结、分析了国内外海上风电机组及海上风电柔性直流输电关键技术及应用的最新技术成果,编著者团队承担完成的科研项目取得的成果,如国家自然科学基金重点项目(编号:60934005)、国家863计划先进能源技术领域智能电网关键技术研发(一期)重大项目(编号:2011AA05AA103)、上海市高新技术产业化重点项目(编号:2009-041)、上海市科技发展基金项目(编号:11195802100)、上海市教育发展基金项目(编号:2010LM26)、江苏省创新基金项目(编号:BC2011028)、江苏省六大人才高峰行动计划(编号:2010-XNY-001)、无锡市科技发展基金(编号:CBE11033)等。编著者的研究生参与了相关研究工作,他们是武黎博士后、张华强博士后、孔屹刚博士、朴海国博士、吴定国博士、李响博士、王国强博士等。第7章的主要内容取自王国强博士的学位论文的部分章节。借此,对于他们取得的研究成果表示感谢。相信本书的出版对于提高我国海上风力发电技术理论研究水平,培养风电事业人才,推动海上风电技术进步及规模化工程应用具有重要价值。

编著者

2012年8月于上海

# 目 录

## 前言

<b>第 1 章 概论</b> .....	1
1.1 海上风力发电 .....	1
1.2 海上风力发电发展现状与态势 .....	3
1.2.1 国外海上风力发电发展情况 .....	3
1.2.2 我国海上风力发电发展情况 .....	9
1.3 海上风力发电的关键技术 .....	12
<b>第 2 章 海上风资源勘测与风电场发电量预测技术</b> .....	17
2.1 海上风资源勘测 .....	17
2.1.1 测风仪 .....	17
2.1.2 海上测风塔安装位置选择 .....	18
2.2 风资源评估 .....	19
2.2.1 风资源的三性 .....	19
2.2.2 风资源评估软件应用 .....	19
2.2.3 风资源评估误差分析 .....	20
2.2.4 风资源评估误差量化修正技术 .....	20
2.3 风电场发电量预测 .....	21
2.3.1 风电场发电量预测计算 .....	21
2.3.2 风电功率预报 .....	22
2.3.3 风电功率预报结果评价方法 .....	28
2.4 海上风电场选址 .....	33
2.4.1 海上风电场场址勘测 .....	33
2.4.2 海上风电场微观选址的目标 .....	34
2.4.3 海上风电场微观选址技术 .....	35
2.4.4 应用案例 .....	36
<b>第 3 章 海上风电机组基础技术</b> .....	37
3.1 海上风电机组基础的设计 .....	37
3.2 海上风电机组基础类型 .....	38
3.3 基础载荷分析 .....	43
3.4 海上风电机组基础的应用 .....	45
<b>第 4 章 海上风电机组安装</b> .....	48
4.1 海上风电机组吊装船 .....	48



4.2	海上风电机组安装方式 .....	49
4.3	海上风力发电工程安装介绍 .....	51
<b>第5章 海上风电机组系统设计技术 .....</b>		<b>55</b>
5.1	概述 .....	55
5.2	大型海上风电机组及其特点 .....	56
5.3	风电机组塔架设计 .....	60
5.4	叶片试验模态分析 .....	62
5.5	风电机组状态监测系统 .....	67
<b>第6章 海上风电场变电站电气设计技术 .....</b>		<b>73</b>
6.1	概述 .....	73
6.1.1	国外海上风电场及海上变电站应用 .....	73
6.1.2	我国海上风电场及海上变电站应用 .....	75
6.2	海上变电站 .....	76
6.2.1	海上变电站的特点 .....	76
6.2.2	海上变电站设计 .....	78
6.3	变压器与海底电缆 .....	81
6.3.1	变压器选型 .....	81
6.3.2	海底电缆选型 .....	81
6.4	电气设备选型与验算 .....	82
6.4.1	电气设备选择原则 .....	82
6.4.2	断路器选型与验算 .....	83
6.4.3	隔离开关选型与验算 .....	85
6.4.4	互感器选型与验算 .....	87
6.4.5	母线(35kV)选型与验算 .....	88
6.4.6	GIS设备选型与验算 .....	89
6.5	海上变电站的保护 .....	89
6.5.1	雷电过电压保护 .....	89
6.5.2	接地保护 .....	91
6.5.3	其他保护 .....	92
6.6	短路计算 .....	93
6.6.1	概述 .....	93
6.6.2	短路计算 .....	94
6.7	海上变电站安装 .....	98
6.8	陆上风电场变电站配置与应用案例 .....	99
6.9	小结 .....	103
<b>第7章 海上风电场柔性直流输电变流器技术 .....</b>		<b>105</b>
7.1	概述 .....	105
7.2	HVDC输电变流器拓扑结构 .....	106

---

7.2.1	传统 HVDC 输电变流器	106
7.2.2	VSC-HVDC 输电用常规变流器	107
7.2.3	多电平变流器	109
7.3	HVDC 输电变流器控制方式	112
7.3.1	调制方法	112
7.3.2	均压控制	116
7.4	MMC 调制与直流均压控制	117
7.4.1	MMC 建模	117
7.4.2	MMC 调制方法	122
7.4.3	MMC 控制方法	126
7.4.4	环流抑制方法	128
7.4.5	仿真验证	130
7.5	VSC-HVDC 输电试验系统	131
7.5.1	VSC-HVDC 输电试验平台	131
7.5.2	控制系统软件设计	134
7.5.3	实验结果	137
<b>第 8 章</b>	<b>海上风电场电力输送技术</b>	<b>140</b>
8.1	大型风电场电力输送技术	140
8.1.1	国内外大规模风电输送技术应用概况	140
8.1.2	大型风电场电力输送关键技术	144
8.2	海上风电场电力输送技术	145
8.2.1	海上风电场电力输送形式	145
8.2.2	海上风电场电力输送技术方案	151
8.2.3	海上风电场内部集电线路布局优化	157
8.3	海上风电场柔性直流输电技术经济性分析	164
8.3.1	海上风电场工程模型及柔性直流输电系统设计	164
8.3.2	海上风电场输电系统技术经济性分析	165
8.4	海上风电场输电工程案例	169
8.4.1	海上风电场交流输电工程	169
8.4.2	海上风电场柔性直流输电工程	173
<b>参考文献</b>		<b>185</b>



# 第 1 章 概 论

## 1.1 海上风力发电

海上风电具有资源丰富、风能资源非常稳定、发电利用小时数高、不占用土地、对生态环境影响小、不消耗水资源和适宜大规模开发等优点，且一般靠近传统电力负荷中心，便于电网消纳，免去了长距离输电的问题，因此，海上风电的开发与利用越来越为全球所关注，例如英国、德国、爱尔兰、丹麦、比利时、荷兰、瑞典等欧洲国家都纷纷加快了海上风电的开发力度。另一方面，相对于陆上风电，海上风电面临浮冰、台风、盐雾等复杂的自然条件，对海上风电机组技术要求更高，海上风电场建设难度更大、成本更高、建设环境更复杂。例如，欧洲某知名风电机组生产厂商的 2MW 海上风电机组运行了一段时间后，一批发电机就曾因出现绝缘故障，而被迫维修更换。除了技术因素外，海上风电开发还要考虑电缆铺设、船舶航运、滩涂围垦以及珍稀禽类保护等多方面的因素。例如，出于保护沿海浅滩区生态和避免影响旅游业的考虑，德国政府就要求海上风电场至少距离海岸 30km。阿尔法·文图斯海上风电场离海岸超过 40km，由于建设地点离岸远、水深、风电机组尺寸大等因素，最终导致该项目耗资大大超过预算，达到 2.5 亿欧元，每千瓦造价超过 3.5 万元人民币。

海上风电场的发电成本与经济规模有关，包括海上风电机组单机容量和每个风电场风电机组台数。据报道，每个海上风电场最佳容量为 120 ~ 150MW。其中，海上风电场投资分配比例一般为：风电机组 51%、基础 19%、海上电气系统 9%、风电机组和基础安装 9%、海上电气系统安装 6%、管理 4%、保险 2%。相对而言，陆上风电场投资分配比例分别为：风电机组 70%、其他 30%。

面对海上风电开发与利用具有的广阔的发展前景，全球风电机组制造企业也纷纷加大海上大型风电机组研发和产业化力度，目前，已能够在海上风电场批量应用的海上风电机组主要有：法国 Areva Multibrid 公司的 5MW 半直驱风电机组、德国 REpower 公司的 5MW 风电机组、丹麦 Vestas 公司的 2MW 和 3MW 双馈异步风电机组、德国西门子公司的 2.3MW 和 3.6MW 风电机组、德国 Bard 公司的 5MW 风电机组、芬兰 WinWind 公司的 3MW 半直驱风电机组等。GE 公司计划研发的新一代 10 ~ 15MW 级大容量风电机组（见图 1-1），采用 GE 磁共振成像系统超导体磁体技术，淘汰了变速箱，由于超导线圈能够产生强磁场，超导发电机

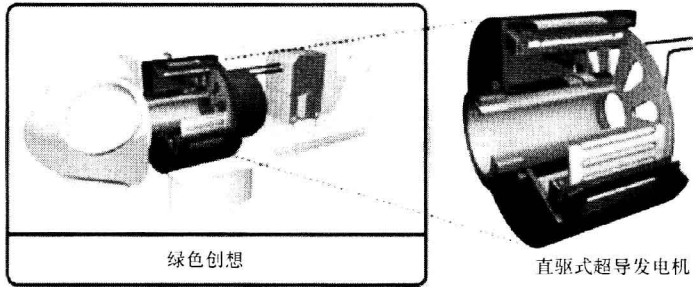


图 1-1 直驱式超导发电机结构示意图

的转矩密度是常规发电机的两倍，因此，降低了对稀土的依赖，减少了发电机中铁的使用量，减轻了发电机的重量。

全球自 1990 年丹麦安装了第一台单机容量为 220kW 的近海示范风电机组以来，截至 2011 年底已建成 80 个海上风电场，累计装机容量达到 4954MW；2012 年，英国的瓦尔内海上风电场二期并网发电，成为世界上最大的海上风电场，总装机容量达到 367MW。预计 2015 年、2020 年，全球海上风电装机容量将分别达到 26GW、70GW。

我国于 2007 年在渤海辽东湾南部海域、距海岸约 46km 处安装了首台 1.5MW 直驱型海上风电机组，该机组通过约 5km 长的海底电缆将发出的电力输送至绥中 36-1 油田独立电网，与 4 台双燃料透平机组组成互补系统。位于上海临港新城至洋山深水港的东海大桥 102MW 近海风电场采用 34 台 3MW 双馈机组，已于 2010 年全部建成并成功并网发电。我国已具备设计制造大型海上风电机组的能力，6MW 大型海上风电机组已完成吊装或试运行。国家科学技术部通过“863 计划”重点资助研发 10MW 大型海上风电机组，计划采用永磁直驱、双馈或超导技术。

我国海上风电产业将重点开发建设江苏、山东基地，推进河北、上海、浙江、福建、广东、广西、海南等地海上风电建设。其中，上海、江苏、浙江、山东、福建 5 省市的海上风电规划装机规模为 10.1GW，其中，近海 5.9GW、潮间带 4.2GW。到 2020 年，以上 5 省市海上风电风电装机规模预计将达到 22.8GW，其中近海 11.7GW、潮间带 5.1GW。截至 2011 年底，我国海上风电（包含潮间带）累计装机容量为 241.3MW。

我国制定的“十二五”能源规划和可再生能源规划中，我国海上风电将发展目标设定为：2015 年建成 5GW，形成海上风电的成套技术并建立完整产业链；2015 年后，我国海上风电将进入规模化发展阶段，达到国际先进技术水平，到 2020 年建成海上风电 30GW。在我国《风力发电科技发展“十二五”专项规划》中明确特大型风电场建设将成为我国风电开发的需求重点，“十二五”期间，我

国将规划建设6个陆上和2个海上及沿海风电基地。

## 1.2 海上风力发电发展现状与态势

### 1.2.1 国外海上风力发电发展情况

早在20世纪80~90年代,欧洲就开始大范围开展海上风能资源评估及相关技术研究工作,随后,一批不同规模的海上风电场项目陆续建成。

1990年,世界上第一台海上风电机组(Wind World 25)安装于瑞典Nogersund海上风电场,容量为220kW。

1991年,Vindeby海上风电场建于丹麦波罗的海洛兰岛西北沿海,安装了11台风电机组(BONUS机组),装机容量为5MW。随后,荷兰、丹麦和瑞典等国家陆续建成了一批海上风电场示范工程项目,装机规模为2~10MW,风电机组的单机容量为500~600kW。这些早期的风电场多建于浅水海域或带有保护设施的水域。

自2000年起,兆瓦级风电机组开始用于海上风电项目,例如,瑞典Utgrunden风电场安装了单机容量为1.5MW的海上风电机组;英国Blyth风电场安装了2台单机容量为2MW的海上风电机组。

2001年,全球第一个具有商业化应用价值的Middelgrunden海上风电场在丹麦哥本哈根附近的海域建成,总装机容量为40MW,共安装了20台单机容量为2MW的风电机组,年发电量为1.04亿kWh。

2002年,世界上第一个大型海上风电场Horns Rev在丹麦北海海域建成,总装机容量为160MW,共安装了80台单机容量为2MW的海上风电机组,占用海域面积约为20km<sup>2</sup>,年发电量为6亿kWh。随后,丹麦的Frederikshaven、Ronland和Samso等大中型海上风电场相继建成。

2003年,迄今为止世界上规模最大的Nysted海上风电场在丹麦建成,总装机容量为165.6MW,共安装了72台单机容量为2.3MW的海上风电机组。

2007年,苏格兰东海岸的Beatrice海上示范风电场成功地安装了单机容量为5MW的海上风电机组,装机规模为10MW。

2008年,海上风力发电的装机总容量为1485.2MW,丹麦、英国、瑞典、德国、爱尔兰、荷兰、中国、日本和比利时等9个国家发展较快,其中,英国累计装机容量达到598.4MW,超过丹麦的415.7MW,成为海上风电装机容量最大的国家。

2009年,欧洲建成38个海上风电场,总共安装了828套风电机组,海上风电总装机容量为2056MW,占全球海上风电装机总量的95%以上。欧洲是海上风电发展最快的地区,根据欧洲风能协会的最新统计,2009年欧洲水域的8个海

上风电场总计安装了 205 台海上风电机组，总容量为 607MW，较 2008 年增幅超过 58%。其中，西门子机组（2.3MW 和 3.6MW 两种机型）146 台，维斯塔斯机组（3MW）37 台，Winwind 机组（3MW）10 台，Multibrid 机组（5MW）6 台，REpower 机组（5MW）6 台，最小装机容量为 2.3MW（挪威的 Hywind），最大装机容量为 209MW（Horns rev 2）。另外，欧盟 15 个成员国和其他欧洲国家，有超过 100GW 的海上风电项目正在规划中。

德国海上风电发展在全球居领先地位，德国可以生产 5MW 以上风电机组的厂家有 4 家，即 REpower、Multibrid、Bard 和 Enercon。海上风电机组研发示范基地位于德国不莱梅港，不莱梅港是德国北海沿线最大的港口城市，目前，不莱梅风电场已安装 12 台不同类型的 5MW 海上风电机组进行对比研究。为鼓励海上风电发展，德国制定了较优惠的风电上网电价（15 欧分/kWh），该试验风电场已并网发电。最大试验风电机组单机功率可以达到 7.5MW，采用复合材料加铝合金的两节叶片结构，叶片长约 60m。德国首个海上风电场（阿尔法·文图斯海上风电场）（ALPHAVENUS）由德国政府和德国能源供应商联合投资，1999 年项目获批准，2006 年开工建设，并于 2010 年并网发电。该海上风电场建在离海岸超过 40km 的北海海域，12 台 5MW 机组，总容量为 60MW，风电机组高度分为 148m、150m 两类，每个叶片长 56m、重 16.5t，基础都打在超过 30m 深的海水中。到 2030 年，德国海上风电装机容量将达到 25GW。

英国是最早进行海上风电开发的国家之一，目前已建成 12 个海上风电场，累计装机 280 余台，装机容量接近 900MW，已超过丹麦成为全球海上风电装机容量最大的国家。英国从事海上风电开发，在海上风电场设计、基础施工、机组运输、安装、海底电缆铺设等方面积累了较为成熟的经验。

2010 年，美国 Deepwater Wind 公司在美国海岸建造全球最大的海上风电场，装机容量为 1000MW，200 台 5MW 风电机组安装在深海，风力机叶片仅高出海平面 150m。如表 1-1 所示，截至 2010 年底，全球已建成 43 个海上风电场，安装了 1339 台风电机组，风电装机，总容量达到 3554MW。全球海上风电主要分布在欧洲的英国、丹麦、比利时和德国，其中，英国 2010 年海上新增装机容量为 925MW，成为海上风电的全球领跑者；德国近两年采用 5MW 和 6MW 大型风电机组建设海上风电场，成为海上风电的后起之秀。表 1-2 所示为部分已建成且运行的海上风电场情况。

截至 2011 年，全球累计装机容量达到 4954MW，新增装机容量超过 1400MW，建有 80 个海上风电场。其中，欧洲新增并网海上风电机组 235 台，新增容量为 866MW（英国新增装机容量为 752.45MW，占比 87%；其次为德国，新增装机容量为 108.3MW；丹麦新增为 3.6MW；葡萄牙新增为 2MW）。

预计到 2015 年，全球海上风电装机容量达到 26GW。如图 1-2 所示，欧洲风

表 1-1 2009 ~ 2010 年海上风电场装机容量 (单位: MW)

国家	2009 年新增装机容量	2009 年累计装机容量	2010 年新增装机容量	2010 年累计装机容量	占 2010 年全球总装机容量的百分比 (%)
英国	306	894	925	1819	51.18
丹麦	228	625.9	207	832.9	23.44
荷兰	0	246.8	0	246.8	6.94
比利时	0	30	165	195	5.49
德国	60	60	108	168	4.73
瑞典	30	163.3	0	163.3	4.59
中国	63	63	39	101.5	2.87
爱尔兰	0	25	0	25	0.7
挪威	2.3	2.3	0	2.3	0.06
总计	689	2110	1444	3554	100

表 1-2 已建成且运行的海上风电场情况

地点	建设时间/年	机组台数/(容量/MW)	离岸距离/km	水深/m
瑞士 Nogersund	1990	1/0.220	0.35	6
丹麦 Vindeby	1991	11/4.95	1.5 ~ 3	2.5 ~ 5
荷兰 Lely	1994	4/2	1	4 ~ 5
丹麦 Tunø Knob	1995	10/5	6	3 ~ 5
丹麦 Dronten-Isselmeer	1996	28/16.8	0.4	5
瑞典 Bockstigen	1997	5/2.75	4	6
瑞典 Utgrunden	2000	7/10.5	8 ~ 12.5	7.2 ~ 10
英国 Blyth	2000	2/4	0.5	7.5
瑞典 Middelgrunden	2000	20/40	2	2 ~ 5
瑞典 Yttre Stengrund	2001	5/10	6	9
丹麦 Høms Rev	2002	80/160	17	6.5 ~ 13.5
丹麦 Palludan Flak	2002	10/23	3.5	11 ~ 18
英国 North Hoyle	2003	30/60	7 ~ 8	10 ~ 15
丹麦 Nysted Havmøllepark	2003	72/165.6	12	10
爱尔兰 Arklow Bank Phase I	2003	7/25.2	14	5 ~ 8.5
英国 Scroby Sands	2004	30/60	2.5	4 ~ 12
日本 Hokkaido	2004	2/1.32	1	/
英国 Kentish Flats	2005	30/90	12	5
英国 Barrow	2006	30/90	8	20

(续)

地点	建设时间/年	机组台数/(容量/MW)	离岸距离/km	水深/m
荷兰 NSW	2006	36/108	/	/
OWEZ	2006	36/72	10 ~ 18	22
苏格兰 Beatrice	2007	2/10	25	45
英国 Burbo Bank	2007	25/90	6	8
瑞典 Lillgrund	2007	48/110.4	/	/
中国渤海湾	2007	1/1.5	60	/
英国 Inner Dowsing	2008	27/97.2	/	/
英国 Lynn	2008	27/97.2	/	/
荷兰 Q7	2008	60/120	/	/
比利时 Thornton Bank	2008	6/30	/	/
德国 Alpha Ventus	2010	12/60	40	30 ~ 40
中国东海大桥	2010	34/102	8 ~ 13	10

能协会公布的正在建设和已经确定了场址的近海风电场到 2015 年已达到 37441.83MW，其中，德国 10927.5MW、英国 8755.8MW、瑞典 3312 MW、荷兰 2833.8MW、西班牙 1976.4MW，此外，挪威、比利时、芬兰、丹麦、法国等国家海上风电规划容量都已超过了百万千瓦。

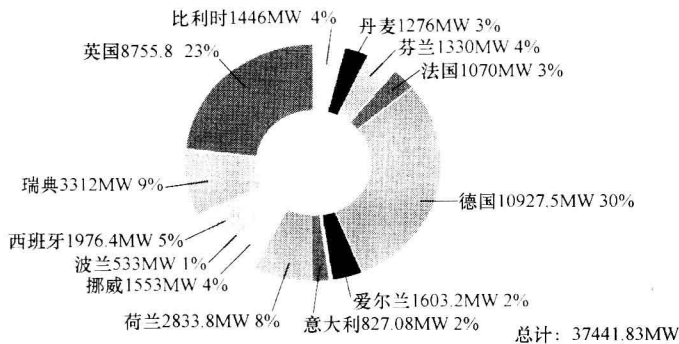


图 1-2 欧洲规划的 2015 年的海上风电场计划

到 2020 年，为了实现欧盟确定的 2020 年可再生能源发电 20% 的发展目标，欧洲海上风电装机容量将达到 70GW，仅英国就计划在海上装机超过 7000 台。与此同时世界上其他国家如美国、加拿大等也都开始了近海风电开发的前期准备工作。

根据欧洲海上风电技术发展情况，可以将海上风力发电归纳为两个发展阶段：



1) 第一阶段, 1990~2001年, 为小规模项目, 多数为500~700kW风电机组的研究及示范阶段。1991~1997年, 丹麦、荷兰和瑞典完成了样机的试制, 通过对样机的试验, 积累了海上风电机组的工作经验; 至2000年底, 全球仅建有8个小型海上风电场, 装机容量为10.5MW, 风电机组的单机容量为220kW~2MW。

2) 第二阶段, 2001年至今, 为兆瓦级以上风电机组商业化应用阶段。2002年, 欧洲新建5个海上风电场, 单机容量为1.5~2MW的风电机组向公共电网输送电力, 开始了兆瓦级海上风电机组发展的新阶段。兆瓦级风电机组的应用, 体现了风电机组向大型化发展的方向。新一代风电机组的容量一般在3~5MW, 叶轮直径为90~115m, 技术已基本成熟并商业化应用。到2007年底, 欧洲共新建了18个海上风电场, 其中, 以大中型海上风电场居多。据统计, 欧洲已有8个国家(丹麦、英国、荷兰、爱尔兰、瑞典、德国、西班牙和比利时)建有海上风电场, 其中, 英国总装机容量位居世界第一, 丹麦位居第二。

目前, 欧洲在海上风电领域一枝独秀, 这不仅得益于欧洲没有台风的优越气候条件, 更为重要的是欧盟各国对于风电的政策扶持与巨大资金投入。欧盟在《战略能源技术计划》(SET)草案中提出, 欧盟要在2020年前努力实现风力发电占有所有供电的比例达到20%左右。虽然现在海上风电提供的电力尚不足欧洲用电总量的0.3%, 但是根据欧盟规划与在建海上风电项目, 估计在未来数年中, 海上风电装机容量将大幅增加。

图1-3所示为到2020年欧洲海上风电规划, 其中, 英国海上风电装机位居榜首。欧洲大力发展海上风电的原因如下:

- 1) 欧盟制订了更长远的可再生能源利用目标;
- 2) 海上风资源丰富、稳定、受干扰小;
- 3) 选址通常在电力需求大的中心城市附近, 因而无需更改现有基础设施;
- 4) 陆上风电实施远距离输送, 需要进行电网改造;
- 5) 可在人口密集地区建设大规模风电项目, 如建设500MW以上海上风电场;
- 6) 与陆上风电项目相比, 减少了视觉干扰;
- 7) 陆上风电场场址选择受到限制;
- 8) 出于能源安全考虑, 不受全球市场因素制约。

对此, 苏格兰制定了一系列可再生能源与气候变化应对政策。2011年可再生能源发电量占31%, 2020年前预计达到50%。应对气候变化, 预期目标为2020年前排放减少43%, 2050年前排放减少80%。

苏格兰有风电王国之称, 拥有欧洲25%的海上风力资源, 平均风速为8m/s以上, 利用率达40%以上, 上述大部分资源均在水深逾30m的水域, 苏格兰已



图 1-3 到 2020 年欧洲海上风电规划

在大型陆上风电场开发方面走在了欧洲的前列，如 Whitelee 风电场（322MW），已计划再建更大的风电场，如 Viking 风电场（540MW）和 Clyde 风电场（548MW）。表 1-3 所示为苏格兰规划建设的海上风电场项目。

表 1-3 苏格兰规划建设的海上风电场项目

序号	风电场名称	开发商	容量/MW
1	Wigtown Bay	DONG Energy	280
2	Solway Firth	E. ON	300
3	Kintyre	SSE Renewables	378
4	Islay	SSE Renewables	680
5	Argyll Array	Scottish Power Renewables	1500
6	Beatrice	SSE Renewables & SeaEnergy	920
7	Inch Cape	RWE Npower & SeaEnergy	905
8	Bell Rock	SSE Renewables & Fluor	700
9	Neart na Gaoithe	Mainstream	360
10	Forth Array	Fred Olsen	415
11	Moray Firth	EDP Renewables & SeaEnergy	1300
12	Firth of Forth	SSE Renewables and Fluor	3500
	合计		11238

## 1.2.2 我国海上风力发电发展情况

### 1. 我国风电上网电价政策

为了促进风电发展，我国对风力发电实行上网电价政策，法律规定电网公司必须购买风电，且必须支付最低价格，电网公司为收购风力发电电量而支付的合理的接网费用以及其他费用，计入电网公司输电成本，从销售电价中回收。

我国风力发电的上网电价政策经历了以下三个阶段：

1) 第一阶段，2003~2005年，风电上网电价由中央招标与地方审批，上网电价为0.38~0.8元/kWh；

2) 第二阶段，2006~2008年，风电上网电价采用两种形式，其一为中央招标与地方审批，上网电价为0.51~0.65元/kWh；另外一种为中央招标，上网电价为0.4~0.55元/kWh；

3) 第三阶段，2009年~至今，将全国分为四类风能资源区，实行风电标杆上网电价，上网电价为0.51~0.61元/kWh。

如图1-4所示，自2003~2011年间，我国风电装机容量受到电价政策的影响很大，特别是2009年开始实施风电标杆上网电价开始，我国风电装机容量快速增长，2009年已超越美国成为全球新增风电装机容量最多的国家，到2010年我国累计风电装机容量实现了对美国的超越，成为全球风电装机容量最多的国家。

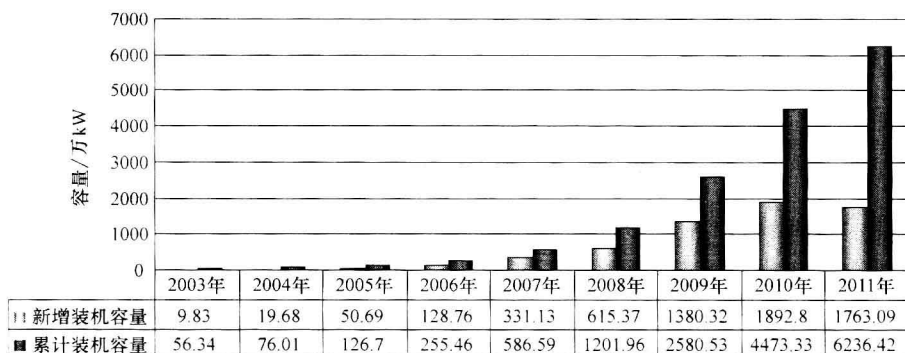


图 1-4 近年来我国风电装机容量

### 2. 我国海上风电资源及利用

我国拥有十分丰富的近海风能资源，近海范围内（25m等深线范围以内）由于海面粗糙度小，风速湍流度小，风向稳定，风速一般比陆地上大。根据我国气象局勘查成果，认为在5~25m水深的海域内，50m高度风电可装机容量约2亿kW；5~50m水深，70m高度风电可装机容量约5亿kW。据估算，我国海上风能的储量是陆上的3倍，具有广阔的开发应用前景。因此，开发海上风能资源