我国海上风电的发展与技术现状分析

倪云林[1]，辛华龙[2]，刘　勇[2]

（1. 中国海洋大学 海洋地球科学学院，山东 青岛 266100；2. 中国海洋大学 工程学院，山东 青岛 266100）

摘　要：对国内外海上风电发展现状进行了对比分析，介绍了我国发展海上风电的优势和面临的困难，并针对海上风电场在设计、施工和运行等阶段可能出现的问题进行了思考和探讨。

关键词：海上风电；发展现状；技术分析

中图分类号：TK89　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1004－3950(2009)04－0021－05

Analysis on the development and present technology status of offshore wind power in China

NI Yun-lin[1], *XIN Hua-long*[2], *LIU Yong*[2]

(1. College of Marinegeoscience, Ocean University of China, Qingdao 266100, China;
2. College of Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The offshore wind power is a new field of wind power. It has intrinsic merits of high wind speed, no land occupation and little environmental condition restrictions. The present status of the offshore wind power development at home and abroad was compared and analyzed. And the superiorities and difficulties we will face in the course of offshore wind power development were introduced. Also, some potential problems on offshore wind power farm design, construction and operation were discussed.

Key words: offshore wind power; present status; technology analysis

0　引　言

风能是一种清洁的可再生能源。与传统的燃煤发电相比，风力发电没有二氧化碳的排放，是理想的绿色能源。世界上许多国家都十分重视风电的开发和利用，并早已着手建设海上风电场，以更加高效、大规模地发展风电，海上风电已成为未来风电发展的必然趋势。

我国从辽宁、山东到浙江、福建、广东、海南一带风能资源丰富，具有发展海上风电的资源基础。如果能够利用这些资源，可以有效缓解东部电力供应紧张的现状。但是我国的海上风电尚处于初级发展阶段，在海上风电场的设计、施工和运营等方面面临着诸多问题，因此，需要不断探索，积极研究，以保证海上风电产业健康、稳定、快速的发展。

1　海上风电发展概况

1.1　欧　洲

欧洲是全球海上风电发展最快的地区。瑞典于1990年在Nogersund安装了世界上第一台海上风电机组，之后，无论是海上风电场的建设还是风电机组的研发，欧洲都走在世界的前列。

欧洲海上风电的发展历史大致可以分为三个阶段[1]：(1)1980—1990年的研究阶段。欧洲各国开始大范围的海上风能资源评估并开展相关的技术研究。(2)1991—2000年的试验阶段。该阶段主要进行小规模的项目研究试验和示范工作，研制500～600 kW级的风电机组。(3)2001年以后的商业化阶段。开始兴建大中型海上风电场，并研发利用兆瓦级的风电机组。

截至2007年，全球已建成了约30座海上风电场，基本分布在丹麦、英国和爱尔兰等欧洲国

收稿日期：2009－05－05

基金项目：中国海洋发展研究中心海大专项资助(AOCOUC200804)

作者简介：倪云林(1986－)，男，浙江舟山人，硕士研究生，主要从事清洁可再生能源的研究。

家,总装机容量约 1000 MW。其中,丹麦的 Nysted 海上风电场总装机容量为 165.6 MW,是世界上迄今为止总装机容量最大的海上风电场[2]。

1.2 中 国

我国的海上风电开发刚刚起步,还缺乏海上风电场建设的经验,尚不具备海上风电场风电机组设备的自主生产能力,这严重制约了我国海上风电的发展,其中后者是主要因素。但令人欣慰的是,近几年我国开始重视海上风电的开发,海上风电产业发展迅猛,风电热潮持续不断。从 2005 年开始,我国开始在浙江岱山、河北黄骅、上海以及江苏如东和东台等地筹建海上风电场。其中最引人注目的当属在建的上海东海大桥两侧 1000 m 以外沿线的海上风电场,预计安装 50 台单机容量 2 MW 的风机,总投资预计 30 亿元,建成后预计年上网电量 25851 万 kWh[3]。

《可再生能源发展"十一五"规划》指出:进行近海风电试验是未来几年发展风电的重点之一,要在沿海地区近岸海域(主要是在苏沪海域和浙江、广东沿海)进行近海示范风电场建设,探索近海风电勘查、设计、施工、安装、运行、维护的经验,在积累一定近海风电运行经验的基础上,逐步掌握近海风电设备的制造技术。

可以看出,在国家相关政策的大力支持下,我国海上风电的发展势头良好,但在风机制造技术等诸多方面与国际水平还存在较大差距。

2 我国发展海上风电的优势和困难

2.1 优 势

(1)我国近海风能资源丰富。东部沿海水深 2 ~ 15 m 的海域面积辽阔,全年风速大于或等于 3 m/s 的时数约为 7000 ~ 8000 h,大于或等于 6 m/s 的时数为 4000 h。按照与陆上风能资源同样的方法估测,海上 10 m 高度可利用的风能资源有 7.5 亿 kW。更重要的是,我国风电有两个很好的特点:第一,冬春两季,风大水少,风电和水电可以形成互补;第二,我国风速的日变化趋势正好和电力负荷曲线相吻合[4]。

(2)发展起点高、速度快。欧洲是世界海上风电发展的领头羊,可以为我国海上风电的快速发展提供有益的借鉴。由此发展自己的海上风电,及时明确发展目标,不断完善扶持政策,优先资源普查和电网规划,确保产品设备质量。

(3)国家政策的大力扶持。2005 年,《可再生能源法》把我国的风电发展纳入了法制框架,并进一步完善了定价机制,有力推动了风电的开发和风电产业的进步。2006 年,《可再生能源发展"十一五"计划》制定了支持风电的税收减免政策,并明确指出:"加强对近海风能开发技术的研究,开展近海风能资源勘察评价和试点示范工程的前期准备工作,建设一两个 10 万 kW 级近海风电场试点项目,并实现向兆瓦级风电机组的升级换代",这有利于推动近海风电场建设,并提高我国的风电设备制造能力。

2.2 困 难

(1)近海风能资源调查不够。海上风电场是以风速高、风功率密度大、湍流强度小等优势来抵消巨大的投资成本,所以准确分析、预测海上风电场风能资源对海上风电场的建设和发展至关重要。但是我国近海风资源普查和详查工作相当薄弱,目前还没有高分辨率的近海风能资源图谱。我国急需加强该方面的经费投入,建设一支专业的技术支持队伍,成立符合国际标准的风能评估机构。

(2)产业和技术的发展相对落后。总的来说,完整的风电产业体系尚未形成,风电设备的认证体系尚未建立。

我国还没有掌握大型风电机组的总体设计技术,现有制造水平远落后于市场对技术的需求。目前,市场的风电机组以兆瓦级为主流,而国内最大功率的定型风电机组仅为 750 kW。要完成单机功率从百千瓦级到兆瓦级的技术提升,难度较大。

(3)自主研发力量严重不足。我国尚处于引进国外先进技术的初级阶段,主要通过技术转让和合资建厂的方式生产风电机组。但在这种模式下,无法得到关键技术或核心技术,这样不仅不能从本质上提高企业的国际竞争能力,而且容易在技术上陷入"知其然而不知其所以然"的尴尬境界。

(4)电网制约。目前我国风电场并网的前期工作还没有规范化,风电还没有完全纳入电网建设规划,且缺少一系列必要的管理办法和技术规定以确保大规模风电的可靠输送和电网的安全稳定运行[5]。

3 若干海上风电场建设问题的思考

3.1 设计阶段

在设计阶段,需要解决三个问题:如何选择风

电场址，如何确定风机基础，如何选取风电机组。

3.1.1 场址选择

海上风电场的选址是一项重要而复杂的工作，需要做好各方面的准备，考虑各方面的因素，以确保将来风电场的正常运行。

(1)风能资源调查。进行海上风能资源的调查可以利用以下几种方法[6]：

①利用长期的沿海陆地气象观测数据和短期海上观测资料，进行海陆风速的相关分析。

②利用船舶报告数据，掌握航线海域的观测数据。

③利用海平面气压网格点的资料和模型软件，估算海面某高度的风况。

④建立海面风场数值模型，模拟计算某海域的风场分布。

(2)现场勘查。勘查内容包括地理信息、地质信息、区域水深和波浪、潮汐、海流等。

(3)气象灾害影响。影响风电场安全运营的气象灾害主要为热带气旋、雷暴、龙卷风、低温及积冰等。在我国东部沿海建设海上风电场，要特别考虑台风对风机的影响，因此，某些看似风能资源良好的场址可能要舍弃。

(4)电网因素。综合考虑陆地变电站位置、电压等级、可接入的最大容量以及电网规划等[7]。

(5)环境及自然景观因素。尽量减少近岸风电场造成的视觉侵扰，通过合理选择场址，合理布置机组，使风电场和海上自然景观有机结合；要保证海洋的航道功能，不能因为风电场的存在影响航道的正常使用，更不能影响船舶的行驶安全；注意减小对海鸟、鱼类等海洋生物的负面影响，注意场址附近的海洋生态保护。

(6)电缆费用。海上风电场的场址选择还需要考虑并网时埋设输电电缆的相关费用。

3.1.2 基础确定

海上风电机的基础结构要承受水动力、空气动力的双重荷载作用，确定基础结构时应该综合考虑风、浪、流的荷载特性，以及海底的地质条件和水深条件等。

(1)环境荷载。应该综合地考虑风载、海浪的周期和波高、海流的流速等环境荷载。例如，当海流流速过大而可能引起海床的冲刷时，就不宜使用单桩式基础。

(2)海底地质条件。主要根据土壤类别来确定基础，例如，沉箱式基础只适用于砂性土及软粘土。

(3)水深条件。水深不仅直接影响基础的尺寸和重量，而且影响波浪荷载，进而间接影响基础的类型。例如，水深大于 10 m 的风电场就不宜采用混凝土重力式基础。

(4)费用。在满足各项物理条件的情况下，应该充分考虑基础的制作费用、安装费用和维护费用，选择最经济的风机基础。

目前，海上风电机基础主要有单桩式、混凝土重力式、多桩式、沉箱式、浮筒式和半潜式等 6 种，其中前 4 种为固定式基础，后两种为漂浮式基础。表 1 给出了不同基础类型的比较[8]。

表 1 不同海上风电基础类型的比较

基础类型	特征描述	适用范围	优点	缺点
单桩式	直径 4 ~ 5 m；壁厚 30 ~ 60 mm	水深 < 25 m	制造简单；不需要整理海床	施工安装费用较高
混凝土重力式	重力力矩抵抗倾覆力矩	水深 < 10 m 的浅水区	结构简单；造价低；稳定可靠	对基础要求高；受海床冲刷影响；连接成本高
多桩式	小直径钢桩	水深 > 30 m 的深海	对基床承载力要求底；质量轻	制造和吊装费用高
沉箱式	钢箱结构，底部敞开，插入海床	砂性土及粘性土	用材少；成本低；运输方便	安装受限于地质条件
浮筒式	由缆索固定在海面上	水深 75 ~ 500 m	对水深不敏感	尚处于开发阶段
半潜式	主体支撑结构浸于水中，由缆绳与海底连接	水深 75 ~ 500 m	受海浪影响小；可支撑 3 ~ 6 MW 风电机	尚处于开发阶段

3.1.3 风机选取[9]

风机是海上风电场的核心产能设备，占整个风电场建设成本的50%左右。风机的选取应该遵循安全可靠、高效经济的原则。

海上风机现场操作和维护很不方便，这就需要对风机的安全可靠性提出更高的要求。第一，要充分做好海上风机防腐蚀、防湿热、防雷击等各项保护措施；第二，为风机的控制系统设计多重备用方案；第三，结合在线诊断，应用智能化控制技术，使风机在故障发生之前可以进行自我调整。

在风机安全可靠运行的前提下，还应该保证风机的高效性和经济性，因此，在选择风机时需要考虑叶片、传动系统等各组成部分的性能。

(1)叶片直径。单个风机额定功率的计算公式为[10]

$$P = \frac{C_p \rho A V^3}{2}$$

式中：P 表示单个风电机组的额定功率，kW；C_p 表示功率系数；ρ 表示空气密度，kg/m^3；A 表示风轮旋转面积，m^2；V 表示风速，m/s。

显然，若要增加风机的额定功率，只有增加 A，即叶片的直径。叶片直径与风机功率的关系如图1所示[10]，可以看出，叶片直径和风机功率之间基本呈二次曲线关系。

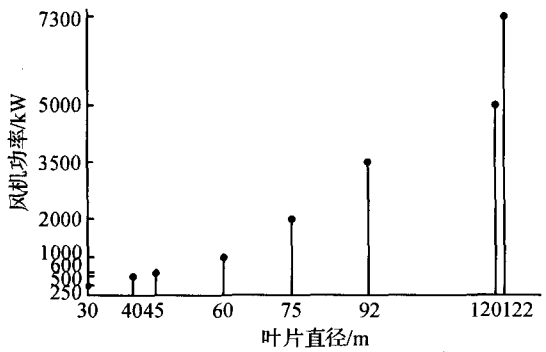

图1 叶片直径和风机功率关系

但是，叶片、传动链的质量和成本是按叶片直径的三次方增加，而轮毂质量阶次更高。因此，要综合考虑功率和造价，选择最经济的风机直径。

(2)叶片数目。目前绝大多数的风机采用三叶片设计，相对两叶片风机而言，三叶片风机能量获取多，视觉效果好。但是，两叶片风机制作成本低、安装费用少，在一定条件下也是值得应用的。

(3)翼尖速度。较高的翼尖速度能够更好地发挥空气动力效益，同时减少主轴扭矩，从而减少部件的成本和质量。但是，较高的翼尖速度不仅会产生更大的噪声影响海洋生物，而且更容易导致叶片前缘的磨损。

(4)气动调节装置。风机通常有桨距调节型和失速调节型。前者利用叶片桨距角的变化改变叶片升阻力，调节风电机组输出功率，后者是在风轮转速基本不变的条件下，利用叶片的气动力失速原理改变叶片升阻力，调节风电机组输出功率。相比较而言，桨距调节型的能量输出更平稳，且能在风速达到一定值时避免停机，增加发电量；失速调节型对阵风的反映灵敏度要求低，且由于风的振动引起的功率脉动也比较小[11]。

(5)风轮风向。有上风向风轮和下风向风轮两种设计。前者让风先通过风轮再经过塔架，后者让风先通过塔架再经过风轮[5]。

(6)传动系统。传动系统的类型有齿轮箱和高速发电机、一体化传动链、直驱式布局、混合传动系统和多发电机系统等。

3.2 施工阶段

海上风电场的建设周期长，各项施工都受限于天气条件，因此应该选择天气相对平静，海况相对良好的季节进行施工，以缩短工期，降低费用。

海上风电场的施工主要可以分为基础施工和风机安装两部分[12]。

(1)基础施工。目前海风电场中最常用的基础型式是单桩基础和重力式基础。

单桩基础的施工应该通过综合考虑桩基直径、质量以及海床地质条件等各方面因素来合理选择打桩锤。打桩锤有柴油打桩锤和液压打桩锤两种。前者如D180筒式打桩锤，其每次最大打击能量为580 kNm，但实际施工过程中能量损失率高达60%～70%，无法完成直径2.5 m以上、重量120 t以上的钢管桩施打任务。后者如S800液压打桩锤，其每次最大打击能量为800 kNm，能量损失率20%～23%，打桩效率高。

重力式基础的施工应该考虑起重船的吊装能力。目前，海上的起重船最大吊装能力为4000 t，国内大型起重船参数见表2。

(2)风机安装。风机安装主要有海上分体安装和海上整体安装两种安装方式。

海上分体吊装就是在海上将风机的各个部件安装到一起。其安装设备有海上自升式平台、起

重船和浮船坞等。依据我国的设备现状及东南沿海的海床特征(大部分为淤泥质粉土海床),建议利用经过改造的浮船坞进行分体安装。具体做法是在我国的现有浮船坞上加装履带吊,并对浮船坞的锚缆系统和坞体进行加固,安装风机时先抛锚初步固定浮船坞位置,然后浮船坞下沉到海床面座底,由履带吊完成风机的安装。

海上整体安装包括陆上安装和海上运输两部分工作。我国的大型起重船只较多,无需改造就能进行施工,因此整体安装在国内也容易实现。

相比两种安装方式,海上整体安装能够节省改装费用,加快工程进度,但需在陆上寻找一个靠近码头且有足够承载力和工作面的陆上拼装场地,在不满足该条件时整体吊装难以实施。

表2 国内大型起重船参数

船名	最大起重重量 主臂/副臂/t	最大吊高 主臂/副臂/m	吃水深度 /m
华天龙	4000/800	98/111	5.5
大力号	2500/200	66/122	5.2
奋进号	650×4/100×2	80/93	5.2
德瀛号	1700/320	80/104	4.1
蓝疆号	3800/800	87/102	8

3.3 运行阶段

海上风电场在运行阶段会产生很多问题,主要是设备的故障率较高,以机组叶片损坏、电缆疲劳损坏、齿轮箱损坏和变压器故障等现象最为常见。因此,需要对机组进行维护,包括定期的检查清洁和故障的维修处理。

海上风机的定期检查可以确保风机运行的可靠性,消除安全隐患;经常性的清洁工作有利于延长风机的使用寿命,保证工作效率。

故障的维修处理较陆上而言难度大,费用高,特别在海况恶劣时,维修人员难以接近,故障无法排除,从而增加停机时间,影响经济效益。

在海上风电场运行过程中,要充分依靠远程监控技术,及时掌握风机设备的工作状况,确保机器得到适时的检修,尽量避免较大故障的发生。

4 结 语

我国海上风电场的建设尚处于起步阶段,在各方面都面临着巨大的挑战。但是,在《可再生能源法》和《可再生能源发展"十一五"计划》的指导下,通过尽快开展近海风能资源的普查工作和大型海上风机的自主研制工作,科学设计,合理施工,并借鉴国外成功的运营经验,就一定能够更好地利用海上风能资源,更好地发展海上风电技术,最终实现我国海上风电产业的崛起。

参考文献:

[1] 黄东风.欧洲海上风电的发展[J].能源工程,2008(2):24-27.

[2] 刘 琦,许移庆.我国海上风电发展的若干问题初探[J].上海电力,2007(2):144-148.

[3] 北青网,上海开建中国首个海上风电场[EB/OL]. http://www.ynet.com/shanghai/view.jsp?oid=18979658.

[4] 黄毅诚.再谈发展风力发电[EB/OL]. http://www.efchina.org/csepupfiles/report/2006102695218370.46950329 443723.pdf/Wind_Generation.pdf.

[5] 李俊峰,高 虎.中国风电发展报告2007[M].北京:中国环境科学出版社,2007.

[6] 李晓燕,余 志.海上风力发电进展[J].太阳能学报,2004,25(1):78-84.

[7] 刘 颖,高 辉.近海风电场发展的现状、技术、问题和展望[J].中国风能,2006,7(3):41-46.

[8] 宋 础,刘汉中.海上风力发电场开发现状及趋势[J].电力勘测设计,2006(2):55-58.

[9] 中国可再生能源学会风能专业委员会.海上风电技术培训资料[EB/OL]. http://www.cgc.org.cn/file/newsShow.asp?id=121.

[10] 葛 川,何炎平,叶 宇,等.海上风电场的发展、构成和基础形式[J].中国海洋平台,2008,23(6):31-35.

[11] 杨 莉.风力发电技术的发展方向和特点[J].农村电气化,2007(3):52.

[12] 江 波.海上风电场施工方法初探[J].太阳能,2007(4):34-36.