

海上风电场建设重大工程问题探讨

张超然, 李靖, 刘星

(中国长江三峡集团公司, 湖北宜昌 443000)

[摘要] 三峡集团公司承担了国家“十一五”科技支撑计划项目中近海风电场选址及风电机组运行、维护技术开发和近海风电机组施工、测试专用设备的研制等有关课题的研究工作,在江苏近海和潮间带建设了多台具有自主知识产权的试验风机。通过研究测风、风资源评估、基础结构、运输吊装、运行维护等海上施工关键技术,以及推动大型海上风力发电机组的研发,探索降低海上风电开发成本的措施。以海水淡化为切入点,开展风电的非并网应用研究,寻求解决风电消纳问题的新方法。

[关键词] 海上风电场;重大工程问题;三峡集团

[中图分类号] TM614 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2010)11-0010-06

1 前言

风能是一种清洁的可再生能源,与传统能源相比,风力发电不依赖矿物能源,没有燃料价格风险,发电成本稳定,也没有包括碳排放等环境成本。此外,可利用的风能在全世界范围内分布都很广泛。正是因为有这些独特的优势,风力发电逐渐成为许多国家可持续发展战略的重要组成部分,发展迅速。与陆地相比,海上风力发电具有环境污染小、风况优于陆地、风湍流强度小、风切变小、各种干扰限制少及海上风电场不占土地等优点^[1],因此,风电的大规模开发潜力在海上,特别是水深小于15 m的浅海,更是今后几十年风电发展的方向。

从欧洲近海风电考察情况分析,欧洲海上风电经过17年的试验、示范、商业化开发,无论从风电机组制造,还是运输、安装技术和设备都比较成熟,目前正在进入规模化发展阶段。2008年以来虽然遭受金融危机,但随着全球化石能源的枯竭和对碳排放的限制,欧洲海上风电仍加速发展。

在我国,可以预计在未来十年,如果得到政策鼓励并在技术上实现突破,海上风电也将得到迅速的发展。据统计,我国近海海域10 m高处风能资源总蓄量为700 GW,风能资源非常丰富。根据浙江省风

电规划,到2010年全省建成陆上风电300 MW;到2015年建成500 MW,其中海上风电约150 MW;到2020年建成900 MW,其中海上风电300 MW。根据江苏省风电规划,到2010年,全省建成陆上风电装机1500 MW;到2020年,全省建成风电装机10000 MW,其中,陆上风电场3000 MW,海上风电场7000 MW。

2 风电发展及面临的问题

发展海上风电是一项系统工程,涉及风能资源、海上风电设备制造、海上风电场运行维护、电网建设等诸多领域,目前仍存在着一些制约性的问题,尤其是海上风电,主要有以下两个主要问题有待突破。

2.1 风电成本太高

在世界范围内,风电从技术上来说已经成熟,但是目前相对于传统发电方式来说风电成本还是偏高。根据欧洲风能协会的测算^[2],陆上风电的投资成本在800~1150欧元/kW,发电成本在4~6欧分/(kW·h),海上风电的投资和发电成本分别比陆上高出50%~100%,投资成本在1250~1800欧元/kW,发电成本在7.1~9.6欧分/(kW·h),依据资源条件不同而有所变化。在我国,由于未掌握风机设备制造的关键技术,导致风电成本居高不下,尤其是海上风电,成本达到了1.0元/(kW·h)以上,在目前电价

[收稿日期] 2010-07-28

[作者简介] 张超然(1940—),男,浙江温州市人,中国工程院院士,教授级高级工程师,长期从事水利水电工程研究工作

政策下,直接限制了海上风电的发展。

2.2 大规模风电并网对电力系统的冲击

根据风力发电设备的特点及其运行特性,风电对电网的影响一般有如下几点^[3]:a. 风电输出功率的大幅变动对电网的影响;b. 风力发电对电网的无功功率影响;c. 风电对并网潮流分布的影响;d. 风力发电的谐波对电网的影响;e. 风电并网对系统的冲击;f. 对公共连接点电能质量的影响。因此,风力发电能顺利并入一个地区电网的电量,主要取决于电力系统对供电波动反应的能力,虽然从理论上分析,电网系统中风电容量占 20% 并不存在很大的技术问题,但电网运行的实践表明^[4],在欧洲风电容量达到 10%、我国达到 5% 之后,整个电网就会面临可能发生的冲击,造成难以预料的结果。而海上风电的开发必须具有规模化效应,其成本才会有较大幅度的降低。

以上原因是制约目前国内海上风电开发的主要原因,截止到目前为止,仅有上海东海大桥完成了部分海上风机的安装工作。

3 三峡集团在海上风电领域所做的工作

3.1 降低海上风电成本

通常的海上风电场成本中风电机组约占一个风电场全部费用的 30%,其他(基础、塔筒、海底电缆、风电场的施工、运行和维护等)约占 70%^[1]。因此海上专用风机、近海风电机组的基础和海上风机的吊装施工被认为是造成近海风电成本较高的 3 个主要因素。

3.1.1 海上施工关键技术

三峡集团公司响应国家号召,积极推动沿海和近海风电的开发,2006 年底三峡集团公司牵头联合中国水利水电科学研究院、中国水电顾问集团华东勘测设计研究院、河海大学共同承担了国家科技部提出的“大功率风电机组研制与示范”研究项目(国家“十一五科技支撑计划项目”)中的十一课题(近海风电场选址及风电机组运行、维护技术开发)和十二课题(近海风电机组施工、测试专用设备的研制),十一课题侧重于海上施工关键技术的研究,十二课题侧重于海上风机吊装技术的研究。根据任务书要求,2009 年底在近海建设具有自主知识产权的 2 MW 海上示范风机一台,并示范运行 2 000 h。江苏响水海上示范风机已于 2009 年 11 月 23 日顺利完成吊装作业,风机离岸 3.5 km,采用半潜驳坐底

配合履带吊分体安装方案。

该项目主要在以下几个方面进行了研究:

1) 海上测风技术:率先在江苏响水示范风机位置设计、建设了两座真正意义上的海上测风塔(江苏近海地区第 1,2 座,我国第 3,4 座),收集了 1.5 a 的测风数据和 1 a 的海洋观测数据。江苏响水海上测风塔高 70 m、桩基础深 4 × 50 m,塔架采用四桩正方形布置,与国内已有的两座测风塔采用高桩现浇混凝土承台的设计不同,在设计施工过程中,创新性地实现了海上施工向陆上转化的设计理念,采用了钢承台的结构形式,减少了海上作业的工程量的工程,钢承台可以在陆地加工完成,施工时只需起重船吊装就位即可,大大减少海上施工的时间和节省施工成本;通过室内试验和大量计算,桩体与承台的连接方式采用了高强灌浆材料灌注为主的关键技术(见图 1),经规范方法计算和有限元方法校核以及现场运行考验,连接段整体受力较好,能满足不同环境荷载下受力要求,为海上风电机组采用导管架基础的设计施工提供了第一手资料。开展了适合我国近海地区的测风塔基础形式、数据采集传输分析方法等技术研究,取得了较为丰富的成果,为类似工程和风机基础积累了海上设计和施工经验。

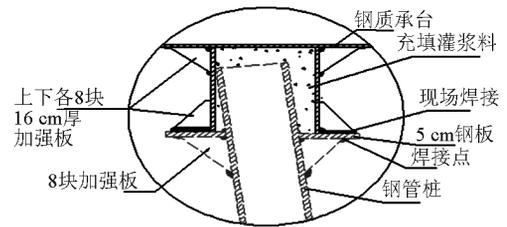


图 1 承台/钢管桩连接示意图

Fig. 1 Cap / steel pipe pile connection diagram

2) 海上风资源评估:利用两座海上测风塔和附近滩涂 5 座陆地测风塔的丰富测风数据及响水气象站近 30 年的气象资料进行了海陆风对比、环境因素对测风数据的影响以及风速与潮位的对应关系等项目的研究。海陆风相关性分析及风速与潮位相关关系分析显示,海、陆风资源在 16 风向扇区具有较好的相关性,潮位对低高度的风速有一定的影响。海上风资源具有较小的湍流强度、风切变指数和较小的空气密度,与滩涂及内陆风资源比较,近海海域风况优于陆上,适合大规模开发近海风电场。提出了可移动式测风塔的概念,并完成了移动式测风塔的结构设计、就位固定、浮运移动等关键技术的研究,为海上测风塔提供了一种新的结构形式,可进一步

减少测风成本和实现快速、移动测风的要求,具有较好的推广前景。

3) 近海风电机组基础结构的研究:结合选定风电场区域的地质条件(我国东部近海区域大多上覆10~15 m 淤泥质),进行了基础结构形式的研究,提出了单桩、3 桩(见图2)、4 桩、5 桩、群桩(见图3)、辅助桩以及筒形基础等多种基础形式,并结合我国的实际海上施工能力,开展了大口径桩基施工技术、桩基承台水平度调整技术和基础精确定位技术等专项技术的研究。鉴于现阶段国内成桩装备技术水平,在桩径小于2.5 m 的条件下,施工能力和施工设备可行、施工技术较为成熟。多桩方案结构较优,目前桩基础形式可采用高桩承台多桩方案,但导管架

基础方案设计依据和技术优势明确,在提高施工技术水平前提下应尽快实施。

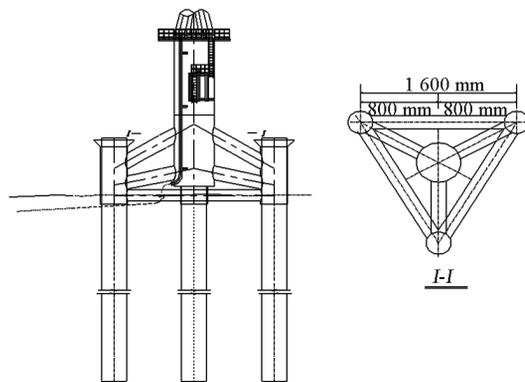


图2 三桩基础示意图

Fig. 2 Tri-pile foundation of offshore wind turbine

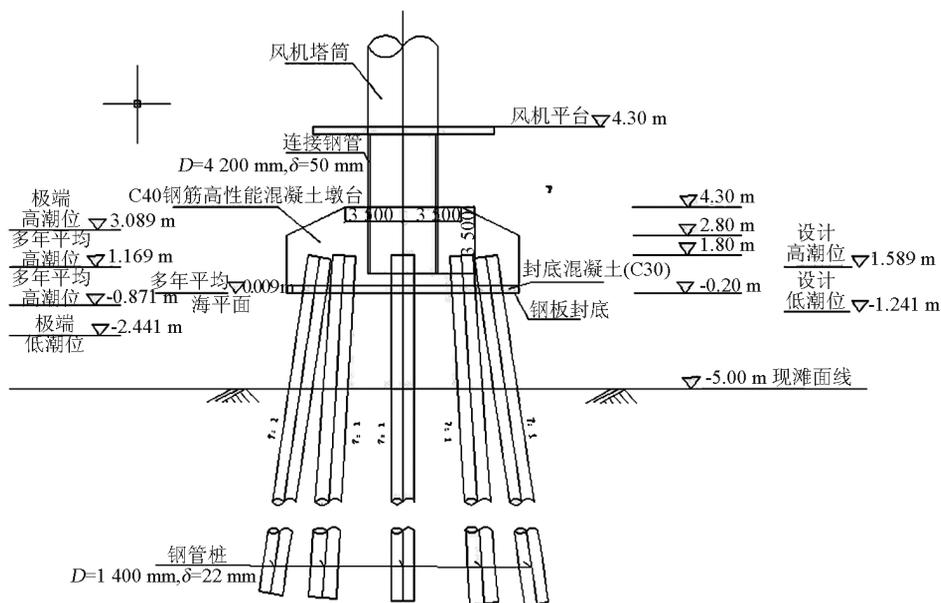


图3 群桩基础示意图

Fig. 3 Multi-pile foundation of offshore wind turbine

4) 环境载荷对基础作用力的影响研究:除了对自重、风荷载、浪荷载等静力荷载进行分析外,重点对风、浪等循环效应下的动力特性及风机结构的动力影响进行研究,同时根据风机高耸结构的抗震要求,对地震动参数选择及输入机制、结构-基础-海水-风-地震联合作用等进行了详细的分析。安排进行现场振动测试(见图4),得到风电机组和结构的动力特性,从而验证机组和结构有限元计算成果,为有效采取振动控制措施提供科学依据,对风、海浪和机组运行作用下测试基础及上部结构振

动量大小,完善结构受力特性研究成果,为长期运行安全、结构损伤评价提供科学依据,为全体系结构设计进行复核和优化提供依据。

5) 海上风机运输、吊装技术研究:结合我国东部近海区域的海床条件(上覆10~15 m 淤泥质土层),分别研究了分体式吊装技术和整体式吊装技术的适用条件和技术特点,并联合中交三航局等海洋设计、施工单位对两种吊装方式的关键技术进行了研究。针对响水近海现场海洋水文条件、海上风电机组安装的安全性和可靠性、施工可实现程度、施

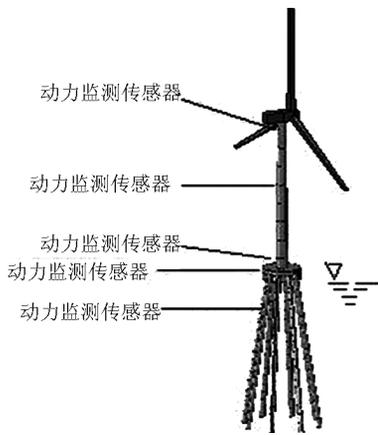


图4 响水风机振动测试点布置示意图

Fig. 4 The measured location of structural vibration of offshore wind turbine on XiangShui

工工期等角度考虑,鉴于现场水深较浅,大型起重船无法进入,提出采用半潜驳分体安装方案(见图5),对潮间带风电机组安装具有指导意义。

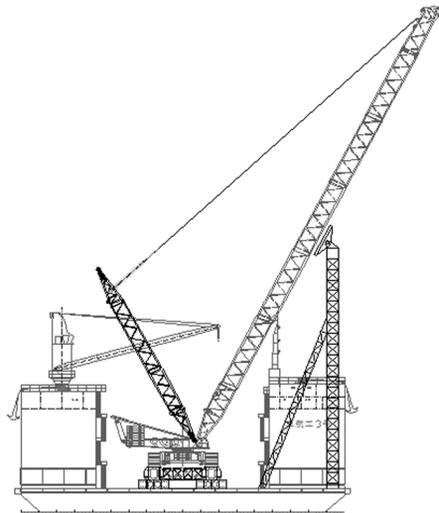


图5 半潜驳分体安装方案

Fig. 5 Semi - submersible barge for installing offshore wind turbine in stages

发电机组的技术标准和规范(三峡标准);通过引进、消化、吸收等方式实现创新,自主研发适用于我国海洋条件的海上风电技术,使风机具有更高的可靠性和更低的制造成本,有效降低海上风场开发的成本投入,提高海上风场经济效益,为我国大规模开发近海风电创造条件。截止到2009年底,在江苏响水近海安装了一台上海电气2 MW海上试验风机,并在江苏响水潮间带安装了上海电气2 MW和金风科技2.5 MW试验风机各一台,2010年还计划安装一台3 MW半直驱海上试验风机。通过近海试点,

6)运行、维护技术:根据两年来近海测风塔建设施工和运行管理所获得的第一手资料,积累了一定的运行维护经验,形成一整套关于海上测风塔运行维护的标准,得出了维护设备的可进入性分析尤其重要的结论,提高海上风机的可靠性和稳定性是减少维护费用最有效、最直接的方法。为今后的海上风机维护工作打下坚实的基础,可为类似工程的运行与维护提供参考。结合我国沿海地区和示范风电场区域的地理、气象条件,研究风电场的运行和维护技术,提出了相应的维护策略,并开发相应的系统管理和系统支撑软件。

3.1.2 海上风机研发

三峡集团公司依托国内两大风机制造商上海电气和金风科技,追踪国内外风电技术发展趋势,根据中国风资源状况、海洋条件以及并网和非并网应用需要,提出适用于规模开发海上风电的技术方案(三峡方案);根据三峡方案,提出和制定大型风力

已在海上风机的大功率化、风机防腐防盐雾等方面取得了长足进步。

3.2 风电的非并网应用

除了研究提高电网的质量,增加电网容纳不稳定功率的能力外,“非并网风电”技术也可以为海上风电提供一种可行的应用方式。所谓“非并网风电”,就是风电系统的终端负荷不再是传统的单一电网,而是直接应用于一系列能适应风电特性的集中耗能产业及其他特殊领域。其主要特点是:将风电直接应用于用户(负载)。风电非并网运行方式

的优势体现在:a. 可以采用直流电,减少电能转换环节,回避风电上网引起的风机电压、频率等控制问题,绕开电网这一限制风电大规模应用的瓶颈,也避免了风电并网对电网系统的影响;b. 提高风能利用效率,简化风力机结构和风电并网运行时所需大量辅助设备,大幅度降低风电设备的制造成本;c. 风电可以直接应用于某些特定产业,变成工业生产的重要能源,明显节约成本,形成产品的强大竞争力。因此,风电非并网技术可以大幅降低风机制造的难度和成本,可以减少并网运行对电网的不利影响,可促进风电的进一步发展。

三峡集团公司联合中国水利水电科学研究院已

经完成了非并网风电应用的前期调研,初步确定前期主要在我国东部沿海进行海水淡化的非并网风电运用和在西北内陆地区进行苦(咸)水淡化的非并网运用。室内模拟试验装置(见图6)已经于2009年完成初步调试,实现了变功率输入风电通过控制系统联动调节海水淡化系统,使其适应不确定的功率输入,从而实现稳定、长期的淡化水作业。2010年8月,日产淡化水5 t的完全独立风电-海水淡化系统(见图7)已经在江苏响水投入示范运行。经初步测算,若采用海上风电进行海水淡化,海水淡化成本可控制在6.00元/(m³·h)左右(海上风电电价按1.00元/(kW·h)计算)。

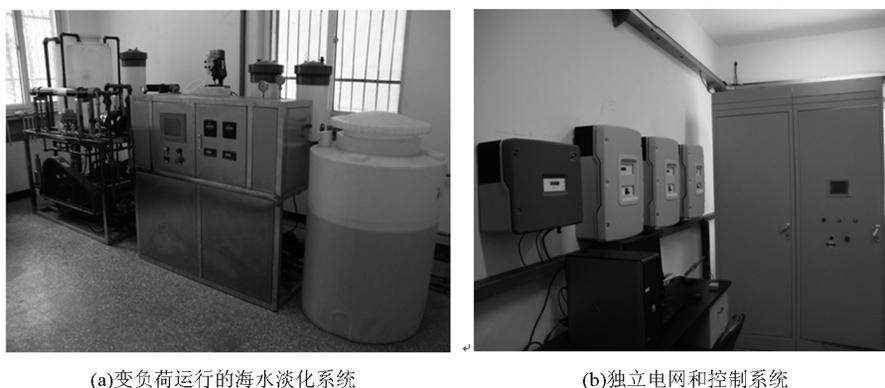


图6 独立风电-海水淡化试验模拟系统

Fig. 6 Simulating system of desalination of sea water by stand-alone wind power in laboratory



图7 独立风电-海水淡化系统现场示范运行

Fig. 7 The system of desalination of sea water by stand-alone wind power on-site

海水淡化的非并网风电运用技术对风电清洁能源的应用和非常规水资源的技术开发、循环经济模式等开辟了新的途径,具有重要的技术、社会经济效益。

参考文献

[1] 李晓燕,余志. 海上风力发电进展[J]. 太阳能学报,2004,25

(1),78-83.

[2] World Wind Energy Association(WWEA). World Wind Energy Report 2008[R]. 2009.

[3] 顾卫东. 中国风电产业发展新战略与风电非并网理论[M]. 北京:化学工业出版社,2006.

[4] 高季章. 我国近海风电发展的若干问题探讨[J]. 水利水电技术,2009,40(9):1-3.

Exploration of major engineering problems of offshore wind farm

Zhang Chaoran, Li Jing, Liu Xing

(China Three Gorges Corporation, Yichang, Hubei 443000, China)

[**Abstract**] China Three Gorges Corporation (CTGPC) is now undertaking the research of offshore wind farms location, wind turbine operation, maintenance technology development, offshore wind turbine construction, development of special test equipment and other subjects related to research topics, which all belong to the National Key Science and Technology Supporting Program of China for the 11th Five – Year Plan, and CTGPC has built several wind turbines with independent intellectual property right in Jiangsu coastal and intertidal zone. CTGPC is exploring the ways to reduce the cost of offshore wind power development, such as through the research of wind measurement, wind resource assessment, foundation structure, transportation and lifting, O&M, and also by promoting the research and development of the large – scale offshore wind turbine. CTGPC is also looking for a new solution to the problem of wind power consumption, by re-searching of seawater desalination and application of non – grid wind power.

[**Key words**] offshore wind farm; major engineering problems; China Three Gorges Corporation

(上接 9 页)

Exploration of major engineering problems on China's offshore wind farm construction

Wang Jingquan, Cheng Jiansheng, Li feng

(Engineering Institute of Engineer Corporations, PLA University of Science
& Technology, Nanjing 210007, China)

[**Abstract**] The development of offshore wind power is of great strategic significance, so it should pay high attention and strength support; the development of offshore wind power is facing a serious challenge and it should be scientifically dealt with avoiding impulsive rash advance. To China's offshore wind power development, we must uphold the scientific development philosophy, the rational and orderly development of the high starting point, and the sustainable and leaping development with combination of innovation and unique features. The cost, benefit and risk restric the development of offshore wind. But through the progress of science and technology, mastering the key technology of wind power, and improving the planning and construction ability, we can effectively resolve the major factors that restrict the development to ensure the healthy development of offshore wind power. In view of the sound and rapid development of offshore wind power, to build high-quality and high effective offshore wind farm, some advice was given.

[**Key words**] offshore wind farm; construction engineering; wind power industry; development strategy