

漂浮式风电场的基础形式和发展趋势

段金辉, 李 峰, 王景全, 程建生

(解放军理工大学工程兵工程学院, 南京 210007)

[摘要] 阐述了海上风电场的分类, 并对漂浮式风电场风电机组的浮式基础作了详细的介绍。随着风电开发技术的成熟, 风机容量大型化、垂直轴风机的应用及建立非并网风电多元化应用系统将是以后漂浮式风电场发展的趋势。

[关键词] 漂浮式风电场; 浮式基础; 垂直轴风机; 非并网风电

[中图分类号] TK83 [文献标识码] A [文章编号] 1009-1742(2010)11-0066-05

1 前言

煤、天然气、石油及核能等非可再生能源是目前世界能源供应的主要形式, 但所带来的环境污染(大气污染、核废料辐射污染等)不容乐观。而风能作为一种清洁的可再生绿色能源, 开发效率高, 经济性好, 具有大规模开发条件和商业化前景, 越来越受到世界各国的重视。随着全球经济的发展, 风能市场也迅速发展起来。近几年来, 世界风能市场每年都以 40% 的速度增长。预计未来 20~25 年内, 世界风能市场每年将递增 25%。现在, 风能发电成本已经下降到 1980 年的 1/5。随着技术进步和环保事业的发展, 风能发电在商业上将完全可以与燃煤发电竞争^[1]。

如今, 风电场主要分布在陆地和近海区域。陆上风电场起步较早, 发展比较成熟, 但存在严重的用地矛盾、噪声污染、优良场址已逐渐开发完毕等问题, 风电的开发逐渐向海上转移。例如, 德国具有经济可开发性的陆上风电开发已接近饱和; 丹麦虽继续开发陆上风电, 但其成本将高于现在常规电力价格水平, 今后这些国家的风电发展重点将转移到海上风力资源的开发^[2], 同时这也是世界可再生能源领域发展的重点方向。

2 海上风电场类型

海上风力资源丰富, 比陆地风力发电量大。通常, 离岸 10 km 的海上风速要比沿岸陆地上高出 25%^[3]。深海区域的风力资源比近海区域更为丰富, 据统计, 美国海域在水深 60~900 m 处的海上风力资源达到 1 533 GW, 而近海 0~30 m 的水域只有 430 GW^[4](见图 1)。据国家发展和改革委员会能源研究所等机构的研究, 中国近海 10 m、20 m 和 30 m 水深以内的海域风能资源分别约为 1×10^8 kW、 3×10^8 kW 和 4.9×10^8 kW。若按照图 1 中数值比例计算, 深海 60~900 m 处的海上风能资源将约占 17.4×10^8 kW, 这意味着海上风力发电发展前景广阔。

海上风电场按所处海域位置分为浅海风电场和深海风电场。浅海风电场在欧洲, 特别是在丹麦、英国等国家起步早, 发展也较迅速。一般适用于浅海区域水深 0~30 m 处, 采用固定式基础形式, 目前应用较多的是单桩式和重力式基础。深海风电场又称漂浮式风电场, 采用漂浮平台(或称浮式基础)将风电机组安置于深海区域。

目前, 国内外对海上风电场的开发仅限于浅海,

[收稿日期] 2010-07-23

[基金项目] 上海交通大学海洋工程国家重点实验室开放课题项目资助(0907)

[作者简介] 段金辉(1985—), 男, 安徽界首市人, 解放军理工大学博士研究生, 从事深海风电场浮式基础的研究分析; E-mail: djh2012@163.com

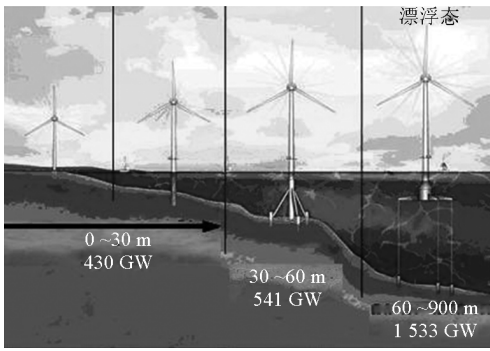


图1 海上风能资源估计图

Fig. 1 Estimation of offshore wind energy resources

所用基础结构均为固定式基础^[5,6],对固定基础平台动力响应研究也比较成熟^[7]。浮式基础结构是海上风电机组基础结构的深海结构形式,主要用于50 m以上水深海域,大多都采用海洋油气工业常用的结构形式,安装水深可达到1 000 m以上。由于深海风电机组承受荷载的特殊性、工作状态的复杂性、投资回报效率等,这种基础形式目前在风电行业仍处于可行性研究阶段。漂浮式基础的设计支配因素主要有风机的推力、上风向风机的偏航稳定性、波浪荷载及其引起的运动(固有周期)。漂浮式基础属于柔性支撑结构,能有效降低系统固有频率,增加系统阻尼。根据海水深度和经济性考虑,深海风电场一般采用漂浮式基础。

3 漂浮式风电机组的基础形式

浮式基础按照基础上安装的风机数量分为多风机式和单风机式。多风机式指在一个浮式基础上安装有多个风机,但因稳定性不容易满足和所花费的成本过高,一般不予考虑。另一种是单风机浮式基础,这种基础主要参考现有海洋石油平台而提出^[8],因技术上有参考,且成本相对较低,是未来浮式基础发展的主要考虑方向。目前,海上风电浮式基础结构主要有荷兰的三浮体结构(Tri-Floater)(见图2),美国的张力腿结构(NREL TLP)和日本的Spar结构^[9]。

尽管很多因素都会影响到浮式基础平台的尺寸、特性,但浮式基础平台的整体结构样式仍是由静稳性决定的。根据平台获取静稳性原理将平台分成3个大的类别。

3.1 压载型平台

该类平台主要是通过平台的重心以下压载重物获得复原力矩以及较高的横摇和纵摇惯性抵抗



图2 荷兰三浮体结构

Fig. 2 Tri-floater of Holland

力,这类平台一般有较强的吃水。Spar平台^[10]就是这类平台的典型代表,现在多用于海上油气田的开发。传统式Spar平台,其主体是一个大直径、大吃水的具有规则外形的浮式柱状结构,主体中一种是硬舱,位于壳体的上部,用来提供平台的浮力。中间部分是储存舱,在平台建造时,底部为平衡稳定舱(见图3)。当平台已经系泊并准备开始生产时,这些舱则转化为固定压载舱,用于吃水控制。中部由系泊索呈悬链线状锚泊于海底。系泊索由海底桩链、锚链和钢缆组成。锚所承受的上拔荷载有打桩或负压法安装的吸力锚来承担。

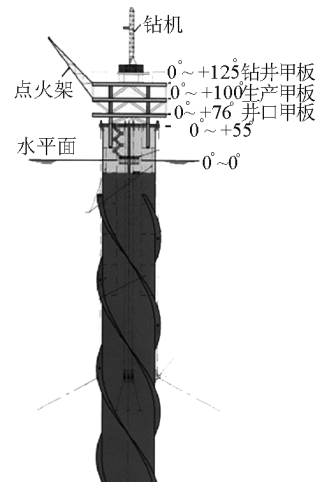


图3 传统Spar平台结构

Fig. 3 Classic Spar platform

将采油用的Spar平台用于海上风机浮式基础,其工作原理相似,也是通过压载舱使整个系统的重心低至浮心之下来保证整个风机在水中的稳定,再通过悬链线来保持整个风机的位置。但结构上可进行改变和简化,以适应风机的工况,如图4(左)

所示。

3.2 系泊缆式平台

该类平台主要通过系泊缆的张力获得稳定性,张力腿(TLP)^[11,12]就是这类平台的典型代表。如图4(中)所示。传统张力腿平台主体一般都呈矩形或三角形,平台上体位于水面以上,通过4根或3根立柱连接下体,立柱为圆柱形结构,主要作用是提供给平台本体必要的结构刚度。平台的浮力由位于水面下的沉体浮箱提供,浮箱首尾与各立柱相接,形成环状结构。张力腿由1~4根张力筋腱组成,上端固定在平台本体上,下端与海底基座模板相连或直接连接在桩基顶端。有时候为了增加平台系统的侧向刚度,还会安装斜线系泊索系统,作为垂直张力腿系统的辅助。海底基础将平台固定入位,主要有桩基或吸力式基础两种形式。

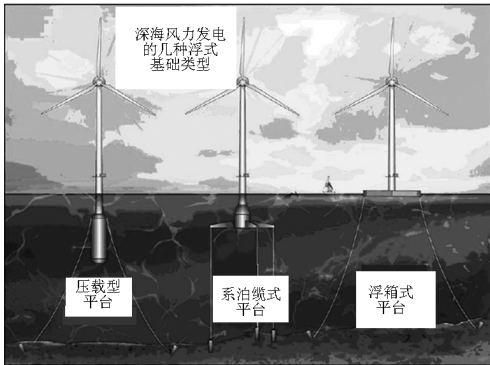


图4 海上风电场浮式基础概念图

Fig. 4 Floating support platform concept diagram of offshore wind turbines

张力腿式平台是利用绷紧状态下的锚索产生的拉力与平台的剩余浮力相平衡的。张力腿式平台也是采用锚泊定位的,但与一般半潜式平台不同。其所用锚索绷紧成直线,不是悬垂曲线,钢索的下端与水底不是相切的,而是几乎垂直的。用的是桩锚(即打入水底的桩为锚)或重力式锚(重块)等,不是一般容易起放的抓锚。张力腿式平台的重力小于浮力,所相差的力量可依靠锚索拉力来补偿,而且此拉力应大于由波浪产生的力,使锚索上经常有向下的拉力,起着绷紧平台的作用。张力腿式平台自1954年提出设想以来,迄今已有50年历史。

3.3 浮箱式平台

该类平台主要利用载重水线面面积通过分布浮

力获得复原力矩,大型平底驳船就是这类平台的典型代表,如图4(右)所示。压载型基础、系泊缆式基础和浮箱式基础都是海洋油气工业中常见的结构形式。依照石油平台结构形式,图5列出一些风电浮式基础概念图,并从左到右标记为1~6。

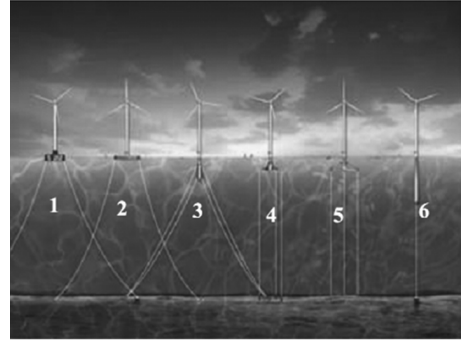


图5 深海浮式基础概念图

Fig. 5 Concept diagram of floating deepwater platform

浮式基础结构组成要素主要包括锚索、锚定地点、浮箱或压载舱。每种要素的不同形式能组合成很多种浮式基础形式,比如TLP平台结构中可以采用吸力式锚或者重力式锚,Spar平台结构中张索数目可以根据设计情况而变化等。但浮式基础和锚泊系统的设计在满足性能稳定的同时必须兼顾整个系统的设计成本。就经济性而言,浮箱式基础是利用载重水线面面积通过分布浮力来获得复原力矩,结构简单且生产工艺成熟,单位吃水成本最低,经济性较好。TLP平台看似结构简单成本较低,但由于结构产生远大于结构自重的浮力,浮力抵消自重后的剩余浮力与预张力平衡,预张力作用在锚泊系统上,使锚索时刻处于张拉的绷紧状态,将会造成锚泊系统和锚固基础形式设计的复杂性^[13]。

4 漂浮式风电场的发展趋势

4.1 单机容量大型化

风力发电装备的大型化,是近年来世界海上风能利用技术发展的一个新的趋势。风电机组自1980年以来,装机容量及尺寸从容量100 kW 转子直径17 m发展到容量5 MW 转子直径超过100 m。未来几年,漂浮式风电场的开发必将带动风电机组继续朝向大型化方向发展。图6为自1980年以来风电机组大型化发展历程图。

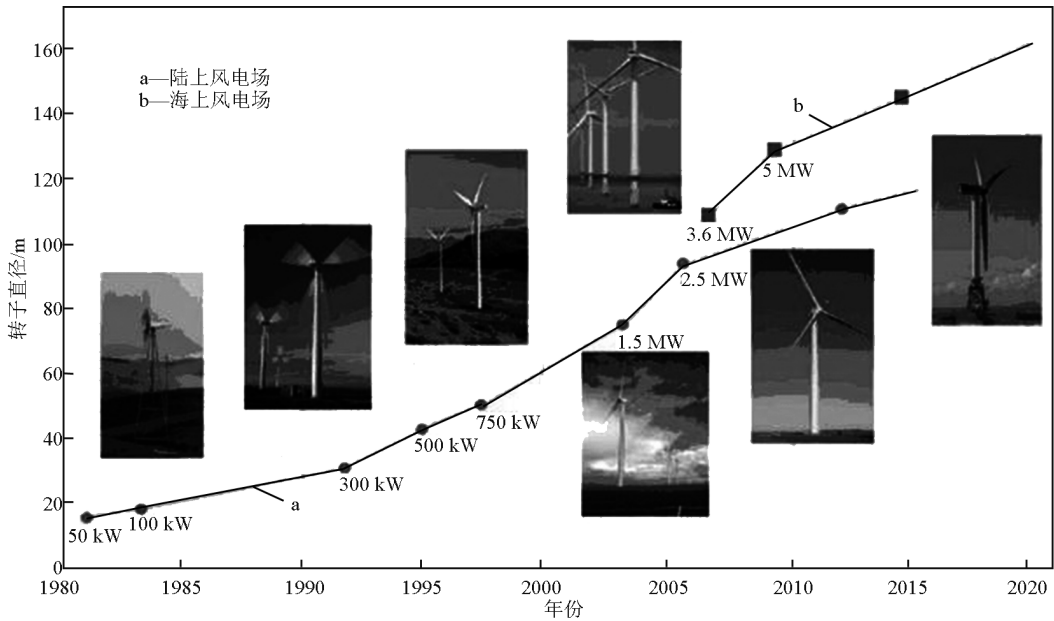


图6 风电机组大型化发展历程图

Fig. 6 Wind turbine technology development process

4.2 低成本、无方向性的漂浮式垂直轴风力发电机的运用

相对于水平轴风力发电机,垂直轴风力发电机有其自身的优点。前者安装维护不方便,且风机重心高,风险性大。后者齿轮箱在底部,重心低,稳定,维护方便,并且降低了成本。垂直轴风力机不必迎风调节系统,可转换360°方位中任何方向风能为电能,主轴转动方向固定。其叶片的尖速比要比水平轴的小,气动噪声小,应用区域增加。漂浮式垂直轴风机集成了垂直轴技术和海上浮动平台技术,大大降低了成本并提高了离岸风力涡轮的发电效率,图7为各种不同的垂直轴风力机的示意图^[14]。

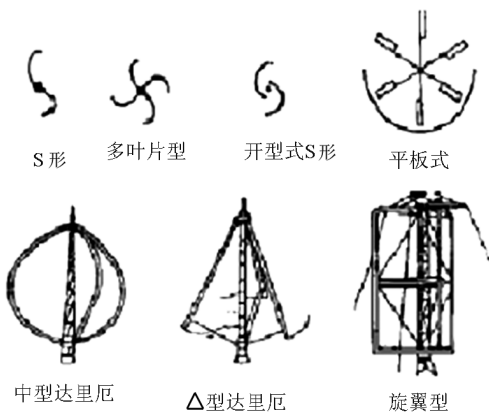


图7 各种形式垂直轴风力机示意图

Fig. 7 Various vertical-axis wind turbines

4.3 建立非并网风电多元化应用系统

漂浮式海上风电场远离陆地,将电力连接到电网系统必须要修建很长的海底电缆,电缆越长,成本越高。所谓非并网风电,简言之,就是风电的终端负荷不是电网,风电可以直接应用于某些特殊的工业生产。优势体现在:a. 简化风电并网运行所需的大量辅助设备,大幅降低成本;b. 风电经过处理可以直接应用于某些特定产业,变成工业生产的“重要原料”;c. 减轻风电并网对电网系统的影响^[15]。

漂浮式风力发电技术不仅是为了充分利用海上风力资源,更重要的是为日益增多的海上活动提供能源,非并网风电多元化应用必将使世界从中受益匪浅。远洋轮船、深海远程潜艇、远程科学考察团等可以在大海上直接获取电能;开发海底石油和矿藏的工程队也可以从海上风力发电站获得充分的电能;电能的保障为开发远海旅游项目提供了可能;非并网风电可以直接应用于海水淡化、氯碱、有色金属冶炼及非金属加工等大范围高耗能产业。

5 结语

在风力发电迅猛发展过程中,深海风电场比近海风电场更具有发展潜力和优势。深海风电场充分利用海洋资源,但投资过大、技术要求过高、平均发电成本过高仍是制约深海发电快速发展的瓶颈。现在,深海区域风力发电仍然处于早期发展阶段,随着

深海风电开发技术的进步,深海风能必将成为世界可再生能源的重要组成部分。我国深海区域风力资源丰富,风电的开发潜力巨大,应积极支持并开展深海风电场研究。借鉴国际上近期研发海洋平台或深海风电场,探讨并提出具有前沿性和先进性的深海风电场建设方案,对我国海上风电产业的健康持续发展是有益的。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 张希良. 风能开发利用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
- [3] 姚兴佳,隋红霞,刘颖明,等. 海上风电技术的发展与现状[J]. 上海电力, 2007,20(2):111-118.
- [4] Jonkman J M, Buhl M L. Load analysis of a floating offshore wind turbine using fully coupled simulation [C]//Proceedings of the Wind Power 2007 Conference & Exhibition. Los Angeles, California: MRI Press, 2007:2-4.
- [5] 尚景宏,罗锐,张亮. 海上风电基础结构选型与施工工艺[J]. 应用科技,2009,36(9):6-10.
- [6] 黄维平,刘建军,赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程, 2009, 27(2):130-134.
- [7] 李静,陈健云. 海上风力发电结构动力研究进展[J]. 海洋工程,2009,27(2):124-129.
- [8] 李飒,韩志强,王圣强,等. 深海石油平台及其锚固基础形式评述[J]. 海洋工程,2008,26(2):147-154.
- [9] 黄维平,刘建军,赵战华. 海上风电基础结构研究现状及发展趋势[J]. 海洋工程,2009, 27(2):130-134.
- [10] 杨雄文,樊洪海. Spar平台结构形式及总体性能分析[J]. 石油矿场机械,2008,37(5):32-35.
- [11] 杨雄文,樊洪海. TLP平台结构形式及总体性能分析[J]. 石油机械,2008,36(5):70-73.
- [12] 徐万海,曾晓辉,吴应湘,等. 深水张力腿平台与系泊系统的耦合动力响应[J]. 振动与冲击,2009,28(2):145-150.
- [13] Sandy Butterfield, Walt Musial, Jason Jonkman, et al. Engineering challenges for floating offshore wind turbines [C]//Copenhagen Offshore Wind 2005 Conference and Expedition Proceedings. Copenhagen, Denmark: Danish Wind Energy Association, 2005:1-5.
- [14] 田海姣,王铁龙,王颖. 垂直轴风力发电机发展概述[J]. 应用能源技术,2006(11):22-27.
- [15] 顾为东. 非并网风电对中国风电发展的影响与前景分析[J]. 上海电力,2007,20(1):11-18.

Foundation and prospect of floating offshore wind farm

Duan Jinhui, Li Feng, Wang Jingquan, Cheng Jiansheng

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

[Abstract] The classification of offshore wind farm and especially the floating foundations of floating offshore wind farm are introduced in detail. The paper also points out that with the mature of wind power technology, fan capacity maximization, the utilization of vertical-axis wind turbine and non-grid-connected wind power system are regarded as the development trend of floating offshore wind farm.

[Key words] floating offshore wind farm; floating foundation; vertical-axis wind turbine; non-grid-connected wind power