

深远海域漂浮式海上风电场基础形式综述

上海绿色环保能源有限公司 ■ 张开华* 陈云巧

摘要: 本文从我国海上风电的概况、国内外海上风电发展现状及漂浮式海上风电场基础形式等方面,对海上风电从近海向深远海域发展的必要性及趋势进行了概述。

关键词: 海上风电; 深远海域; 基础形式; 漂浮式

1 我国海上风电发展概况

根据《风电发展“十三五”规划》(以下简称《规划》),我国要积极稳妥地推进海上风电建设,到2020年,全国海上风电开工建设规模达到1000万kW,力争累计并网容量达到500万kW以上。

《规划》同时指出,要重点推动江苏、浙江、福建、广东等省的海上风电建设,到2020年,4省海上风电开工建设规模均达到百万kW以上;积极推动天津、河北、上海、海南等省(市)的海上风电建设;探索性推进辽宁、山东、广西等省(区)的海上风电项目。据统计,截至2017年8月底,我国海上风电开工项目累计容量已达到4799.5 MW。海上风电项目核准、开工的速度不断加快,随着海上风电的发展,各地也相应调整了海上风电的布局。

近期已实现并网的典型海上风电场项目包括:中广核如东的150 MW海上风电场,离岸距离为25 km,最大水深为18 m;华能如东的300 MW海上风电场,离岸距离为12~25 km,水深为5~15 m;鲁能东台的200 MW海上风电项目,该项目是国内建成的离岸最远

项目,场区中心离岸距离为36 km。

随着技术的进步,为了追求更好的风能资源和扩大项目规模,我国海上风电必将由近海向远海、深海进军。

2 国内外海上风电场发展现状

早在2005年,欧洲就已经开始对漂浮式风电机组进行模型试验和样机测试。挪威国家石油公司于2009年安装了第一台2.3 MW的样机,并于2017年在苏格兰北部海域开工建设了第一个漂浮式海上风电场,采用5台Siemens 6 MW风电机组和Spar式基础,该漂浮式海上风电场已于当年10月成功实现并网发电。由美国Principle Power公司设计的WindFloat基础形式也于2011年用于葡萄牙西南海域的1台风电机组样机上,据报道,2018年该基础形式将用于法国在建的一个漂浮式海上风电场。

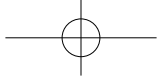
国内目前在建和已建的海上风电场的离岸距离大多在30 km以内,水深未超过30 m。

2015年,湘电风能开展了“基于钢筋混凝土结构的海上风电机组局部浮力基础研制”的课

收稿日期: 2018-05-07

基金项目: 上海市科学技术委员会科研计划项目(课题)(16DZ1203500)

通信作者: 张开华(1963—),男,本科、高级工程师,主要从事新能源海上风电场开发方面的工作。zhangkhk@sina.com



题研究；金风科技开展了“浮筒或半潜平台式海上风电机组浮动基础关键技术研究及应用示范”的课题研究。

3 发展深远海域风电的意义

发展风能是我国能源实现可持续发展的需要，海上风力发电已成为当前研究和应用的热点。目前我国已建及规划的海上风电项目均集中在近海地区，但随着近海资源的开发利用逐渐饱和，海上风电产业必将向着深远海域发展。

我国拥有绵长的海岸线，且东海和南海海域面积辽阔，风能资源丰富，水域较深，具备建设漂浮式海上风电场的基本条件。但由于漂浮式风电机组对风电机组设备、风电机组基础、建造与安装、电力输送、风场监测等关键技术的要求都很高，并且对经济成本也很敏感，目前在国内开展相关研究的机构并不是很多。

深远海域风电场的建设工程复杂，需完成深远海域风电场的特性研究、技术设计、设备制造、工程实施和运行维护等多方面的技术科研课题，才能为项目实施提供良好的实践条件，并将项目打造成具有国际一流水平的样板工程。通过对漂浮式示范海上风电场的建设和试运行进行研究，可掌握相关关键技术，为进一步丰富海上风电场选址提供规划与储备，为后续大规模开发深远海域漂浮式海上风电场提供可靠的数据和经验等。

4 漂浮式海上风电场的几种基础形式的优缺点

应用于漂浮式海上风电场的基础形式主要有3种，分别为：张力腿(TLP)式、半潜(Semi-Sub)式和立柱(Spar)式，如图1所示。下面对3种基础形式的优缺点分别进行介绍。

1)TLP式基础控制平台的浮力大于自重，通过锚固在海底的拉索保持稳定；目前TLP式基础的水深能达到1500 m。由于TLP式基础的稳定性良好且造价相对低廉，目前已经出现很多



a. Spar 式

b. Semi-Sub 式

c. TLP 式

图1 3种基础形式

TLP式风电机组概念，国际上已有多台样机采用TLP式方案，比如BLUE H项目。

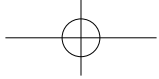
2)Semi-Sub式也被称为浮力稳定式，其依靠自身的浮力保持平衡，位置保持依赖锚链系统；目前自升式平台水深能达到3000 m以上。漂浮式海上风电场中出现很多采用Semi-Sub式基础的设计概念，并有多台样机建成试验，比如WindFloat项目、福岛未来项目。

3)Spar式也被称作压载稳定式，其平台总体线形呈圆柱形，控制压载使重心低于浮心，继而达到稳定，位置保持依赖锚链系统；该平台主要适用于深水域，目前最大水深能达到3000 m以上。漂浮式海上风电场中出现很多采用Spar式基础的设计概念(主要在深水区)，并有多台样机建成试验，比如Hywind项目、川岛项目。

5 项目开展中的困难

目前，TLP式基础的3个水平自由度运动的固有频率较其他漂浮式基础更接近波浪能量集中的频率范围，因此，其在频率设计方面存在较大难度。其次，由于服务水深的区别，TLP式基础的张力筋腱及其连接装置无法直接采用张力腿石油平台的设计，因此需要进行创新研发，其研发难度和决策风险都较大。第三，TLP式基础的拖航、安装等施工难度也较大，尤其是张力筋腱的安装，需要特殊工艺及精确调节。

Semi-Sub式基础的稳定性较差，(转第40页)



2.2 结果分析

非定常 CFD 方法可比其他方法更有效地预测气动尾流效应, 因为其考虑了粘性效应和涡尾流, 并考虑了风电机组叶轮绕轮毂中心旋转时的流场相互作用。图 5~图 13 表明, 应用 BEM 方法计算得出的功率值与 CFD 方法计算结果的差异值均小于 15%。3 种运动相比, 纵摇-纵荡联合运动下, BEM 方法与 CFD 方法计算结果的差异最大。因此, 漂浮式风电机组在复杂剧烈运动下, 采用 BEM 方法对空气动力的模拟准确度存在不确定性。此外, GDW 方法的计算结果远高于 BEM 方法, 而与 CFD 方法较为接近。在 1/4 周期, 因为附加速度的增加, 增强了叶片和流场之间的相互作用, 而使功率增加; 然而在 4/4 周期, 由于附加速度的降低, 功率减小; 在 2/4 和 3/4 周期, 叶片和流场之间的相互作用减弱。由此可见, 附加速度和非轴向角对气动性能起着关键作用。

3 结语

通过对 CFD 方法、BEM 方法、GDW 方法的模拟结果进行对比, 得出 FAST 软件在复杂工况下(风浪流联合作用下)与 STAR CCM+ 软件的计算结果存在一定差异的结论, 特别是在大运动的情况下, 这种差异尤为明显。因此, 需要进一步研究 FAST 软件在漂浮式风电机组空气动力

特性的仿真模拟中的应用。

参考文献

- [1] Matha D, Schlipf M, Cordle A, et al. Challenges in Simulation of Aerodynamics, Hydrodynamics, and Mooring-Line Dynamics of Floating Offshore Wind Turbines[A]. the 21st Offshore and Polar Engineering Conference[C]. Maui, Hawaii, 2011-06.
- [2] Minu Jeon, Seungmin Lee, Soogab Lee. Unsteady Aerodynamics of Offshore Floating Wind Turbines in Platform Pitching Motion using Vortex Lattice Method[J]. Renewable Energy, 2014, 65(5): 207 - 212.
- [3] Anand Bahuguni, Krishnamoorthi Sivalingam, Peter Davies, et al. Implementation of Computational Methods to Obtain Accurate Induction Factors for Offshore Wind Turbines[A]. the ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering[C]. San Francisco, California, USA, 2014.
- [4] Thomas Sebastian, Matthew Lackner. Offshore Floating Wind Turbines - An Aerodynamic Perspective[A]. 49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition[C]. Orlando, Florida, USA, 2011.
- [5] Thomas Sebastian, Matthew Lackner. A Comparison of First-Order Aerodynamic Analysis Methods for Floating Wind Turbines[A]. 48th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition[C]. Orlando, Florida, USA, 2010.
- [6] Garrel A. Development of a Wind Turbine Aerodynamics Simulation Module[R]. Technical Report ECN-C-03-079, 2003.
- [7] Gordon L J. Challenges in Modeling the Unsteady Aerodynamics of Wind Turbines[A]. 21st ASME Wind Energy Symposium and the 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting[C]. Reno, Nevada, USA, 2002.
- [8] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5MW Reference Wind Turbine for Offshore System Development[R]. Technical Report NREL/TP-500-38060, 2009. 太阳能

(接第 18 页)横摇和纵摇两个自由度的运动较 TLP 式风电机组更大, 影响发电效率, 还可能会影响风电机组的设备寿命。由于 Semi-Sub 式基础需要使用悬链线锚链系泊, 所占用的海域面积也远大于 TLP 式占用的海域面积, 穿梭于风电场中的海船会存在与锚链相碰的风险; 且当水深较浅时, 悬链线锚链的系泊设计也存在较大困难。Semi-Sub 式基础的运动幅度可能会更大, 对于动态电缆的要求会更高, 是否能够研制出满足要求的动态电缆也是不确定因素之一。

6 结语

由于国家政策的大力支持及近年来海上风电的自身发展, 大力开发漂浮式海上风电场将是以后风电发展的重点。我国海上风电经过数年的学习及发展已经初具规模, 并已建成投运第一座近海海上风电场——东海大桥海上风电场。相信在政府的支持及企业的推动下, 完成漂浮式海上风电的开发, 实现近海到深远海域的突破指日可待。太阳能