

风与波浪联合作用下浮式风机系统的耦合动力分析

李鹏飞, 程萍, 万德成*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室,
高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

*通信作者 Email: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 本文对 OC4 项目的一种半潜式浮式风机系统进行了不同程度的动力耦合分析。首先忽略平台运动对风机气动性能的影响, 将风机载荷简化为定常的推力作用于平台; 然后, 本文将风机叶片简化为致动线模型, 并结合到两相流 CFD 求解器 naoeFOAM-SJTU 中, 进行了风机-平台-锚链的耦合动力分析。该耦合分析模型考虑到了平台运动对风机气动性能的影响, 以及风机和锚链载荷对平台运动响应的影响。最后, 本文对比了两种不同简化程度的方法的差别。结果显示: 气动载荷对平台的纵荡和纵摇影响较大, 而平台运动也使气动载荷产生较大的波动。耦合分析模型还捕捉到了简化模型不能捕捉到的平台横荡和首摇运动。

关键词: OC4; 浮式风机; 致动线; 耦合; 气动载荷

1 引言

风能被认为是最有潜力的可再生能源之一, 更被预言为“第三次工业革命”的能源支柱^[1]。当前陆上风力发电已经取得了与水力发电相当的发电成本, 但在环境友好和可持续性方面则远胜水电。在开发陆上风电的同时, 人们将目光投向了海上风电。相比于陆上风场, 海上风场的风资源具有强劲、稳定、湍流度小的优点。截止到 2014 年年底, 中国已经安装了 229.3MW 的海上风电, 这些风机全部安装在潮间带和滩涂。与此同时, 许多欧洲国家开始向海上浮式风电技术进军。

在众多备选的浮式方案中, spar、TLP 和 semi-submersibles 是三种可行性较高的方案^[2]。本文主要研究半潜式风机平台在风与波浪联合作用下的耦合动力性能。由于面临复杂的海洋环境, 设计海上风机是一项非常具有挑战性的工作, 特别是对于浮式风机。由于浮式平台的运动而增加的额外自由度使得海上浮式风机的尾流场呈现高度不稳定的特性^[3]。在先

前的研究中,浮式风机表现出显著地纵荡和纵摇运动^[4-6]。由于问题本身的复杂度及大尺度实验数据的缺乏,准确模拟海上风机气动力-平台水动力-系泊力之间的动力耦合效应十分困难。目前,几乎所有具有整体耦合分析能力的代码都使用叶素动量理论(BEM)来计算风力机叶片上的气动载荷^[3]。Karimirad和Moan^[4]使用Simo-Riflex-TDHMILL程序包,对OC3-Hywind Spar浮式风机系统进行了简化分析。他们将气动力简化为随相对风速变化的函数,水动力则采用Panel方法和Morison公式计算。Nielsen等^[7]对hywind浮式系统进行了模型尺度的耦合动力分析,并与尺度模型试验的结果进行了比较。Riddier等^[8]指出,Morison公式和势流理论的经验特性无助于新的浮式支撑平台的设计。Sebastian和Lackner^[9]指出传统的BEM加上一些修正(如动态入流、偏航/倾斜模型等)并不能准确描述叶片和尾流之间的相互作用。更先进的耦合分析模型似乎成为必要。其他研究者如:郭真祥基于star-CCM+研究了三种浮式平台的运动性能的优劣^[5];Nematbakhsh等^[10]将风机简化为恒定的推力,研究了一种TLP浮式系统的动态响应;Idaho大学的Quallen^[11]等人进行了浮式风机系统的两相流全CFD模拟,他们采用Overset技术来处理平台和风机叶片周围的网格运动。在这些研究中,自由面是完全非线性的,并且没有使用任何经验修正。

在本文中,两相流CFD求解器naoeFOAM-SJTU^[12]用于求解浮式平台在波浪上的运动,naoeFOAM-ms模块用于求解系泊系统。为了在可接受的时间代价下准确模拟风机叶片和尾流的相互作用,本文基于原本的致动线模型(Actuator Line Model,以下简称ALM),将其扩展到适用于非稳态情形,即考虑平台运动对致动线模型的影响,下文将详细阐述其实现。

2 数值方法和求解流程

本文主要关注平台的运动响应以及波动变化的气动载荷。为了模拟平台水动力和系泊力,以及风机气动力之间的耦合动力效应,本文基于OpenFOAM平台开发了非稳态致动线模块,并实现与naoeFAOM-SJTU的耦合。

2.1 流体控制方程

naoeFOAM-SJTU采用不可压的雷诺平均Navier-Stokes方程作为水气两相流的总控制方程^[12]:

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho U}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho(U - U_g))U = -\nabla p_d - g \cdot x \nabla \rho + \nabla \cdot (\mu_{eff} \nabla U) + (\nabla U) \cdot \nabla \mu_{eff} + f_\sigma + f_s + f_\varepsilon \quad (2)$$

其中, U 和 U_g 分别表示流场速度和网格节点速度; $p_d = p - \rho g \cdot x$ 为流场动压力,等于总压力减去静水压力; g 、 ρ 分别为重力加速度、流体密度; $\mu_{eff} = \rho(\nu + \nu_t)$,称为等效

动力黏性系数； f_σ 为表面张力，只有在自由面处有影响，其余位置取值为零； f_s 为数值造波中的消波源项，作用是减少波浪反射，该项仅对于消波区有效； f_e 为代表叶片对流场影响的体积力，由致动线模型给出。

2.2 致动线模型

Quallen 等^[10]采用先进的 Overset 网格技术，进行了浮式风机系统的两相流全 CFD 模拟，是浮式风机系统 CFD 全耦合模拟方面的一次勇敢尝试，尽管他们给出的结果十分有限。虽然基于 CFD 方法即 overset 技术，完全求解平台及叶片表面流动是可能的，但要花费高昂的计算代价。因此，本文尝试改造致动线模型，并将其结合到 naoeFOAM-SJTU 中，使之能够求解叶片与其尾流的相互作用。致动线模型将真实的风机叶片用虚拟的致动线来代替，因此它不需求解复杂的叶片表面流动，从而网格量可大大减小，而且不需要处理叶片旋转的复杂网格技术，因此大大降低了计算时间^[13]。叶片沿展向离散成一系列具有恒定弦长和扭角的截面，流场力分布其上(图 1-a)。Vaal 等^[14]考虑平台 surge 运动对致动盘模型的影响，尝试了用致动盘方法研究浮式风机的气动性能。受其启发，在本文中，对原始的致动盘 ADM 方法做了一些修改，以使其能体现平台运动自由度所导致的叶片与其尾流的相互作用。如图 1-b 所示，某个致动点的相对风速 U_{rel} 等于来流速度 U_{in} 加上旋转速度 U_{rot} 在加

上平台运动引起的速度 U_w 。相对风速 U_{rel} 及相对于风轮平面的流动角 φ 由下式计算：

$$U_{rel} = U_{in} + U_{rot} + U_w \quad (3)$$

$$\varphi = \arctan \left(\frac{U_{rel,z}}{|U_{rel}|} \right) \quad (4)$$

得到了流动角 φ ，进一步就可以得到局部攻角 $\alpha = \varphi - \gamma$ 。其中 γ 为局部桨距角。然后用

叶素理论计算叶片上受到的升力和阻力。

$$f = (L, D) = \frac{dF}{rdrd\theta dz} = \frac{\rho U_{rel}^2 c N_b}{2rdrd\theta dz} (C_l \overline{e_L} + C_d \overline{e_D}) \quad (5)$$

其中， C_l 和 C_d 分别是二维机翼的升阻力系数。为了避免奇异性，机翼截面受到的升阻力需要以体积力的形式光滑地分布在附近流场的网格节点中。实际上，我们一般采用高斯分布函数来光滑，即求升阻力与一个正则核的卷积， $f_\epsilon = f \otimes \eta_\epsilon$ ，其中：

$$\eta_\varepsilon(d) = \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (6)$$

这里， d 表示网格中心和第 i 个致动点的距离。而宽度参数 ε 则用于调节正则化载荷的集中程度。因此，流场中 (x, y, z) 处，叶片反作用于流场的每单位体积的体积力由下式计算：

$$f_\varepsilon(x, y, z, t) = \sum_{j=1}^N f_i(x_j, y_j, z_j, t) \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d_i}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (7)$$

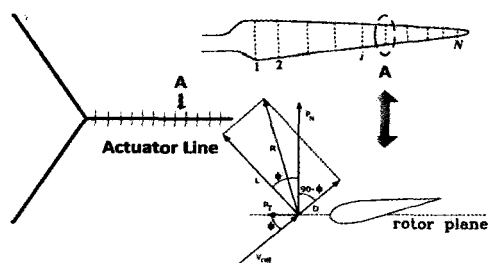


图 1(a) 叶片离散

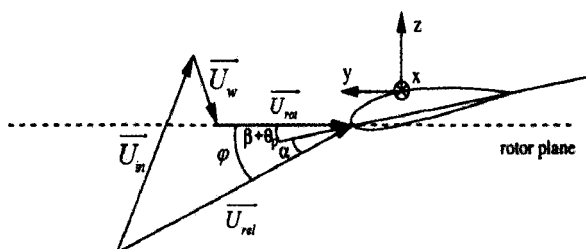


图 1(b) 局部截面上的速度三角

2.3 6DoFs 运动和求解流程

在 naoeFOAM-SJTU 中，六自由度运动的求解采用两个坐标系：一个是大地坐标系；一个是固结在船体上的随船坐标系。运动方程在随船坐标系下求解，而力的计算则在大地坐标系下进行。在每个时间步，由六自由度运动引起的某个致动点的速度分量由下式更新：

$$U_{w,i} = [J][U_c + \omega_c \times (x_i - x_c)] \quad (8)$$

其中 $[J]$ 为从随船坐标系向大地坐标系转换的转换矩阵。 U_c ， ω_c ， x_c 分别为旋转中心的速度、角速度和位置坐标。图 2 描述了求解器进行耦合动力分析的大致流程。

3 计算模型及算例设定

3.1 计算模型

OC4-Phase II 中定义的浮式风机系统由如下三部分组成：DeepCwind 半潜式浮式平台、NREL 5MW baseline 风机、以及 3 根悬链线组成的系泊系统。平台设计水深为 200m，设计吃水 20m；风机叶片为 3 叶片，静止时轮毂位于海平面上 90m；系泊线关于 Z-axis 对称分

布 (见图 2a, 2b)。

表 1 浮式系统的质量和惯性矩

平台总质量(包括压载水、轮毂、机舱、塔架)	1.402E+7kg
总的质心 CM(除了叶片和锚链)	(0.01228,0,-10.2604)
总的横摇惯性矩(关于 CM)	1.0776E+10 kg·m ²
总的纵摇惯性矩(关于 CM)	1.0776E+10 kg·m ²
总的首摇惯性矩(关于 CM)	1.2265 E+7 kg·m ²

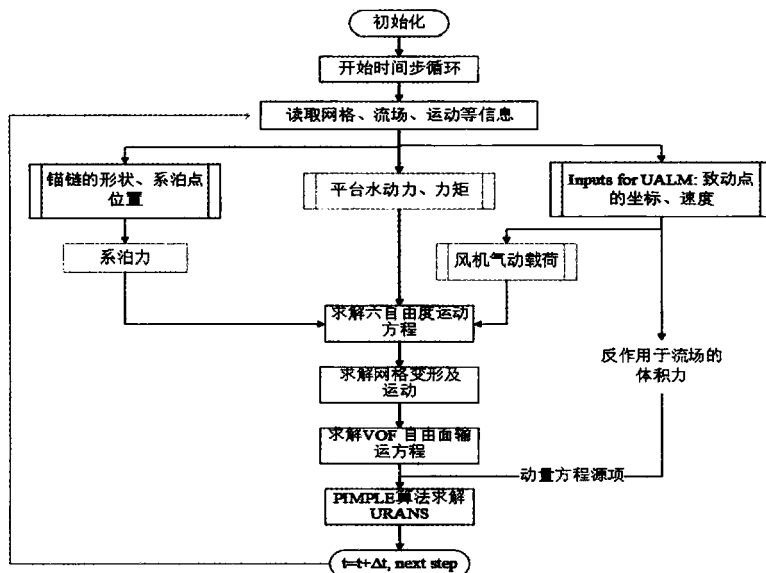


图 2. 求解器的算法流程

在本文中，风机塔架、机舱以及平台被当做一个刚性的整体，在六自由度运动方程的求解中计及了塔架和机舱的质量。表 1 列出了相关的质量和惯性矩。

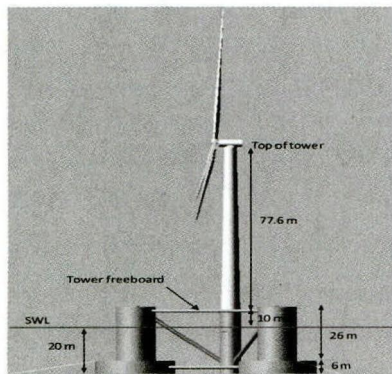


图 2(a) DeepCwind 浮式风机系统

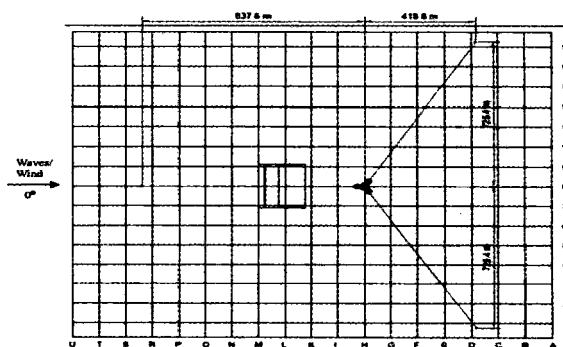


图 2(b) 系泊线布置

3.2 算例设定

在本文中,所有算例的波浪均取文献[15]所给的 5 级海况,系泊作用力用分段外推法计算。定常力简化模型(算例 a)和全耦合分析模型(算例 b)的算例设定归纳在表 2 中。在定常力简化模型中,风机的气动力简化为一个定常的推力,将之变换到平台质心,就得到一个等效的作用于平台的力(262kN)和力矩(2.63E4 kN·m),该推力按文献[15]所给的标准设计值选取。在全耦合分析模型中,瞬态致动线模型被用于计算瞬时的风机尾流场及气动载荷,并考虑风剪切,入口风速设为指数分布的剪切风。

表 2 算例的数值模拟条件

算例	风	波浪	风机转速	输出
a	无	Regular airy: $H = 3.66\text{m}, T = 9.7\text{s}$	Locked	平台运动响应, 锚链力
b	Steady, shear: $V_{\text{hub}} = 5\text{m/s}$	Regular airy: $H = 3.66\text{m}, T = 9.7\text{s}$	9rpm	气动载荷, 平台运动响应, 锚链力

算例 b 的计算域及局部网格切面如图 3-a,3-b 所示,入口边界距离平台 1.5 个波长,气相计算域的高度为 $4D$ (D 为风轮直径),水深取为 140m (在此深度波浪及平台对流场的扰动已经可以忽略)。主要在自由面、平台附近及风机近尾流区域进行了加密,网格量为 220 万。对于算例 a,计算域与算例 b 基本相同,除了气相部分,由于不需要计算气动力,只取了 50m 高,仅用于自由面的计算。对于两个算例,左边都为波浪入口边界条件,右边为远场条件,右后方设置一个波长的消波区,用于减少数值水池的波浪反射效应。

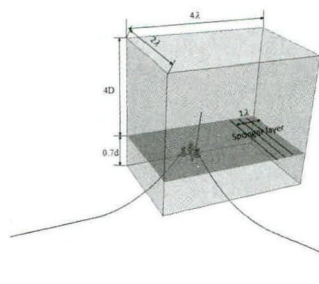


图 3(a) 计算域

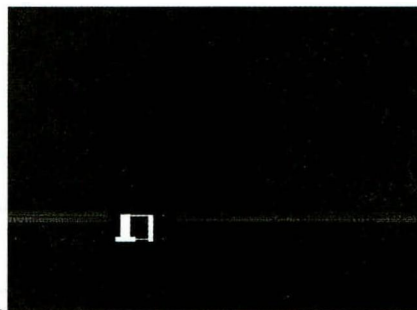


图 3(b) 局部网格加密

4 结果与分析

本文主要关注平台的瞬时运动对风机的气动载荷的影响,以及气动载荷对平台运动响应的影响。通过两个不同复杂程度的(半)耦合模型的对比分析,探讨平台运动和气动载荷之间耦合效应的重要性。同时,本文也给出了流场结构的简要分析,这也是 CFD 的优势所在。下文将给出表 2 中给出的算例的结果及分析。

4.1 气动载荷

在算例 a 中, 气动力简化为定常推力 (262kN), 作用于平台。算例 b 中, 由瞬态致动线模型计算的气动力时间序列如图 4 所示。可以看到, 由于平台运动, 风轮的气动载荷起伏变化较大, 叶片捕获的风功率也变化很大, 这表明在浮式风机中, 必须采用合适的控制策略以确保输出功率的稳定。

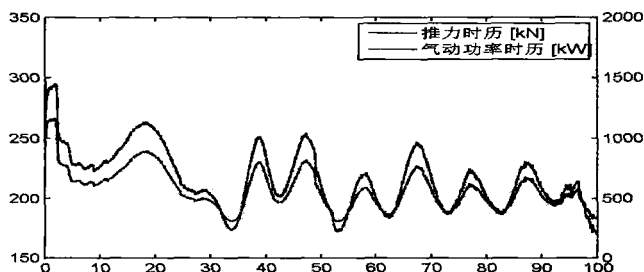


图 4 气动载荷时历曲线 (case b)

4.2 平台及锚链运动响应

对于半潜式风力机平台主要是 surge、heave、pitch、yaw 的响应较大。图 5 给出了算例 a、b 平台运动响应的对比。在算例 a 中不考虑气动力和水动力的耦合, 严重低估了平台的 surge、yaw 方向的运动响应, 并且高估了平台的纵摇运动。在致动线全耦合模型中还捕捉到了平台具有小幅度的横荡和横摇运动。对于平台的垂荡运动, 耦合效应影响很小, 可以忽略。有趣的是, 考虑气动力和水动力的耦合时, 平台除了产生很大的纵荡运动外, 还产生了幅值接近 2° 的首摇运动, 而这在非耦合算例 a 中完全没有捕捉到。因此在计算平台运动响应时, 有必要考虑平台和风机的耦合效应。

4.3 流场分析

叶片的尾涡结构可以使用速度梯度的二阶不变量 Q 来表示, 如图*所示。图*中波浪用波高来染色。叶尖和叶根处都产生了清晰且稳定的螺旋状尾涡, 可以看到尾涡向下游略微膨胀, 而且由于平台运动, 风轮与其尾流相互作用, 尾涡结构有些变形。图*显示了 x 方向的速度云图。来流经过风轮后, 速度降低较大且沿叶片展向较为均匀, 特别是叶尖处的速度降低很大, 而叶根处的速度降低很小, 这表明越靠近叶尖, 叶片上负载越大。

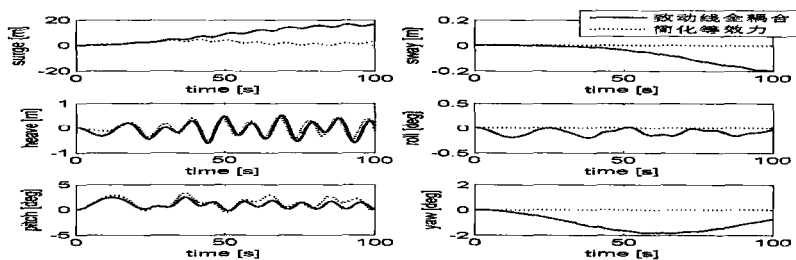


图 5 平台运动响应的对比

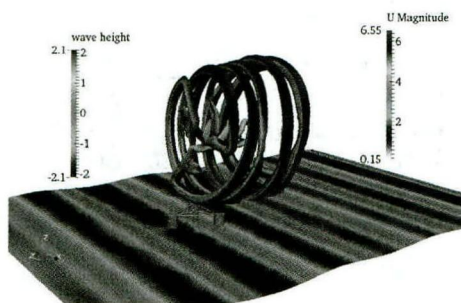


图6 流场尾涡结构及波高

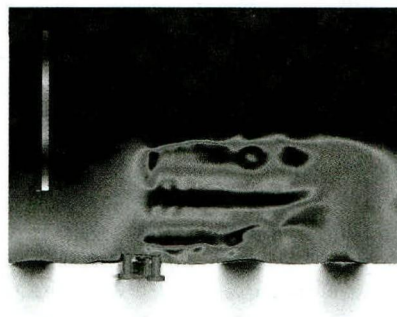


图7 x方向的速度云图

5 结论

本文考虑平台运动对致动线模型的影响，将其扩展到非稳态情况，并实现和 naoeFOAM-SJTU 的耦合。在耦合分析模型中发现，平台除了产生较大的 surge 和 pitch 运

动外，还产生了幅值接近 2° 的首摇运动。这是之前的研究没有捕捉到的。平台的运动也对

风机的推力和风功率捕获产生了较大影响。因此浮式风机系统的设计中，考虑平台运动和风机气动载荷之间的相互影响很有必要。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目 (Grant Nos 51379125, 51490675, 11432009, 51411130131), 长江学者奖励计划 (Grant No. 2014099), 上海高校特聘教授 (东方学者) 岗位跟踪计划 (Grant No. 2013022), 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 (Grant No. 2013CB036103), 工信部高技术船舶科研项目的资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Cordle, Andrew, and Jason Jonkman. State of the art in floating wind turbine design tools. The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.
- 2 Butterfield, Sandy, Walter Musial, and George Scott. Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2009.
- 3 Matha, Denis, et al. "Challenges in simulation of aerodynamics, hydrodynamics, and mooring-line dynamics of floating offshore wind turbines." The Twenty-first International Offshore and Polar Engineering

- Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2011.
- 4 Karimirad, Madjid, and Torgeir Moan. "A simplified method for coupled analysis of floating offshore wind turbines." *Marine Structures* 27.1 (2012): 45-63.
 - 5 郭真祥. 浮体式风力机受风与波浪耦合作用下运动之数值模拟研究. 台湾大学工程科学及海洋工程学研究所学位论文, 1-147, 2013.
 - 6 Tran, Thanhtoan, Donghyun Kim, and Jinseop Song. "Computational Fluid Dynamic Analysis of a Floating Offshore Wind Turbine Experiencing Platform Pitching Motion." *Energies* 7.8 (2014): 5011-5026.
 - 7 Nielsen, Finn Gunnar, Tor David Hanson, and Bjørn Skaare. "Integrated dynamic analysis of floating offshore wind turbines." 25th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers, 2006.
 - 8 Roddier, Dominique, et al. "WindFloat: A floating foundation for offshore wind turbines." *Journal of Renewable and Sustainable Energy* 2.3 (2010): 033104.
 - 9 Sebastian, T., and M. A. Lackner. "Characterization of the unsteady aerodynamics of offshore floating wind turbines." *Wind Energy* 16.3 (2013): 339-352.
 - 10 Nematbakhsh, Ali, David J. Olinger, and Gretar Tryggvason. "A nonlinear computational model for floating wind turbines." ASME 2012 Fluids Engineering Division Summer Meeting collocated with the ASME 2012 Heat Transfer Summer Conference and the ASME 2012 10th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels. American Society of Mechanical Engineers, 2012.
 - 11 Quallen, Sean, et al. CFD simulation of a floating offshore wind turbine system using a quasi-static crowfoot mooring-line model. The Twenty-third International Offshore and Polar Engineering Conference. International Society of Offshore and Polar Engineers, 2013.
 - 12 Shen, Zhirong, et al. "The manual of CFD solver for ship and ocean engineering flows: naoe-FOAM-SJTU." Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University (2012).
 - 13 Sofensen, Jens Nøtkær, and Wen Zhong Shen. "Numerical modeling of wind turbine wakes." *Journal of fluids engineering* 124.2 (2002): 393-399.
 - 14 Vaal, JB, de, M. O. Hansen, and T. Moan. "Effect of wind turbine surge motion on rotor thrust and induced velocity." *Wind Energy* 17.1 (2014): 105-121.
 - 15 Robertson, A., et al. Definition of the semisubmersible floating system for phase II of OC4. Offshore Code Comparison Collaboration Continuation (OC4) for IEA Task 30 (2012).
 - 16 Robertson, Amy, et al. Offshore code comparison collaboration, continuation: Phase II results of a floating semisubmersible wind system. EWEA Offshore 2013 (2013).

Coupled dynamic simulation of a floating wind turbine system in wind and waves

LI Peng-fei, CHENG Ping, WAN De-cheng *

(State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, Shanghai 200240, China)

*Corresponding author, Email: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: The coupled dynamic response and fluctuating aerodynamic loads of a floating offshore wind turbine (FOWT) system are studied in this paper. An unsteady actuator line model (UALM) is developed and applied to the NREL 5MW baseline wind turbine in the Offshore

Code Comparison Collaboration (OC4). This model is implemented into the two-phase CFD solver, naoeFOAM-SJTU. Two kind of full-system simulations with different complexity are performed: first, the wind forces are simplified into a constant thrust; second, the fully coupled dynamic analysis with wind and wave excitation is conducted by utilizing the UALM. The interactive effects between the platform motion and aerodynamic loads are included in this model. The predicted platform surge and yaw motions in the fully coupled case are considerably high compared to simplified model. The fully coupled simulation with higher complexity predicts higher overall platform motion. The platform motion also significantly impact the power harvest of the rotor.

Key words: Coupled dynamic simulation; FOWT; unsteady actuator line model; OC4; wind and waves.