

水轮机位置对 Spar 式风-流系统动力响应的影响

傅键斌¹, 杨 阳¹, 李 春², 房 方³

(1. 宁波大学 海运学院, 浙江 宁波 315211; 2. 上海理工大学 能源与动力工程学院, 上海 200093;

3. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 100096)

摘 要:为研究水轮机安装位置对 Spar 式风-流互补系统耦合动力学特性的影响,基于开源软件 OpenFAST 和商用软件 AQWA 建立了 Spar 式风-流互补系统气动-水动-伺服-弹性全耦合仿真模型。运用叶素动量理论、模态法和辐射绕射理论分别计算了水轮机安装于水平面以下 -70, -80, -90, -100 和 -110 m 处的平台运动、系统输出功率及系泊张力,并与无水轮机时的计算结果进行对比分析。结果表明:当水轮机安装于水平面 -110 m 时,与无水轮机时相比平台纵摇平均值降低了 11.57%,系统输出功率增加 10.15%,说明 Spar 式风-流互补系统在提升功率的同时还可以增强系统运动稳定性。

关 键 词:风-流互补系统;Spar 式平台;风力机;水轮机

中图分类号:TK83

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2024.05.018

[引用本文格式]傅键斌,杨 阳,李 春,等.水轮机位置对 Spar 式风-流系统动力响应的影响[J].热能动力工程,2024,39(5):160-167. FU Jianbin, YANG Yang, LI Chun, et al. Dynamic response of a Spar wind-current energy system influenced by hydroturbine installation position [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2024, 39(5): 160-167.

Dynamic Response of a Spar Wind-current Energy System Influenced by Hydroturbine Installation Position

FU Jianbin¹, YANG Yang¹, LI Chun², FANG Fang³

(1. Faculty of Maritime and Transportation, Ningbo University, Ningbo, China, Post Code: 315211;

2. School of Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai, China,

Post Code: 200093; 3. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources

(North China Electric Power University), Beijing, China, Post Code: 100096)

Abstract: In order to investigate the influence of hydroturbine installation position on the dynamics characteristics of the Spar integrated wind-current energy system, this paper established a fully coupling aerodynamic-hydraulic-servo-elastic simulation model of Spar integrated wind-current energy system based on the open-source software OpenFAST and the commercial software AQWA. Using blade element momentum theory, modal analysis and diffraction-radiation theory, the platform motion, system output power and mooring tensions were calculated for the cases in which the hydroturbines were installed at 70 m, 80 m, 90 m, 100 m and 110 m below the mean sea level, respectively. The simulation results were analyzed and compared with the calculation results without hydroturbine. The results show that when the

收稿日期:2023-03-17; 修订日期:2023-04-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52101317);浙江省自然科学基金青年项目(LQ22E0001);新能源电力系统国家重点实验室开放课题(LAPS22009)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (52101317); Natural Science Foundation of Zhejiang Province-Youth Fund (LQ22E0001); Open Fund in the State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (LAPS22009)

作者简介:傅键斌(1997-),男,宁波大学硕士研究生。

通信作者:杨 阳(1992-),男,宁波大学副教授。

hydroturbines are installed at 110 m below the mean sea level, the mean value of the platform pitch is reduced by 11.57% compared with the results in the case without hydroturbines. The output power of the system increases by 10.15%, indicating that the Spar integrated wind-current energy system is not only capable of improving the power output, but also of enhancing the operational stability of the system.

Key words: wind-current energy system, Spar platform, wind turbine, hydroturbine

引言

为实现我国“碳达峰”和“碳中和”的能源发展战略目标,开展可再生能源利用技术研究已成为一个热点问题。Spar 型浮式平台具有结构简单、稳定性好等优点,已成功应用于漂浮式风电领域,深水海域采用 Spar 型浮式装置可有效降低风力发电成本。

国内外学者开展了关于 Spar 型浮式风电平台的相关研究。周国龙等人^[1]以 5 MW Hywind Spar 平台为研究对象,分析了垂荡板安装在平台不同位置处的频域和时域响应,发现垂荡板可以提升 Spar 平台的运动特性。Si 等人^[2]为减少环境载荷对浮式风力机平台的影响,提出在平台上安装调谐质量阻尼器,针对不同性能指标采用不同的优化方法对调谐质量阻尼器参数进行优化,结果表明,不同参数的阻尼器对平台受到的环境载荷也不同。丁勤卫等人^[3]通过水动力学软件 AQWA 研究螺旋侧板设计参数对 Spar 风电平台动态响应的影响,结果表明,螺旋侧板可明显抑制 Spar 平台的运动响应。Chen 等人^[4]设计 Spar 式和半潜式风力机模型并比较了两者在不同工况下的动态特性,对比发现,Spar 式风力机不仅对风载荷更为敏感,而且纵荡和横荡运动轨迹更为规律。郭翼泽等人^[5]运用计算流体力学方法研究了风剪切与平台纵摇对风电机组气动性能的影响,结果发现,风剪切与幅值较低的纵摇运动对截面气动载荷的影响相当。王博等人^[6]为进一步提升 Spar 平台稳定性,通过 Fortran 编程在 AQWA 软件中模拟了风波耦合作用下新型平台与传统 Spar 平台的动态响应特征,对比发现,新平台纵摇与垂荡均显著减小。白雪峰等人^[7]研究了不同振幅平台的纵摇、纵荡和横摇运动以及相互之间耦合运动的气动功率变化,结果表明,纵摇-横摇-纵荡耦合运动最大功率波动达到额定功率的两倍以上,平台耦合运动会显著增大平均发电量。Meng 等人^[8]对比

了 6 MW Spar 式风力机及陆上风力机动态特性,结果发现,Spar 式风力机叶片最大平面外位移和极限塔基前后弯矩均比陆上系统更大。

以上研究大多针对 6 MW 及以下功率的 Spar 式风力机。然而,随着社会发展能源需求不断加大,漂浮式风电行业的发展面临着风力机制造、安装和运输方面的高成本挑战。有效的解决办法之一就是提升风电机组单机容量,采用 10 MW 及以上容量的浮式风力机。Xue 等人^[9]针对 DTU 10 MW 风力机设计了与之对应的 Spar 式平台和悬链线系泊系统,并且通过数值模拟验证了系统的可靠性。Ai 等人^[10]以 DTU 10 MW 风力机和 Spar 平台为模型,设计出新型控制器,控制器有效补偿了波浪引起的转子振荡,从而达到减弱转子速度变化的目的。胡天龙等人^[11]以 10 MW 风力机为研究对象,考虑风-波载荷耦合作用,利用等效梁法对模型进行分析,结果表明,风力机塔顶位移主要受波浪载荷控制。Wang 等人^[12]研究了台板柔性对 10 MW 浮式风力机传动系统动力学特性的影响,采用解耦分析法对比了刚性和柔性台板模型中齿轮和轴承在不同环境条件下的载荷效应和疲劳损伤,结果表明,台板柔性会增加齿轮箱内部轴承的载荷效应,而减小主轴承的载荷效应。

深海区域不仅蕴藏大量的风力资源,而且还有丰富的潮流能。因此,在浮式风电平台上安装潮流能水轮机的风-流多能互补系统是一种具有广泛应用前景的新型能源装置。周斌珍等人^[13]对比了多种应用在风能、波浪能和潮流能联合发电系统上的水动力数值模拟方法,综合考虑计算精度和效率,采用黏性修正的势流方法是一个可靠的方案。Wan 等人^[14]提出“Spar Torus Combination”概念,其中包括 Spar 式风力机和一个圆环形状的波浪能量转换器,通过模型实验和数值模拟的方法,证明了 Spar 式风力机与波浪能量转换器之间存在积极的协同作用。Michele 等人^[15]建立了一个分析混合风波能量

1.2 风力机参数

本文研究对象为某 10 MW 风力机。该风力机风轮直径为 178.3 m,轮毂高度为 119 m,在额定风速为 11.4 m/s 下实现 10 MW 的设计功率,其主要参数如表 2 所示。

表 2 风力机主要设计参数

Tab.2 Main design parameters of wind turbine

参 数	数 值	参 数	数 值
功率/MW	10	最小风轮转速/ $r\cdot min^{-1}$	6
叶片数	3	额定风轮转速/ $r\cdot min^{-1}$	9.6
风轮直径/m	178.3	最大发电机转速/ $r\cdot min^{-1}$	480
轮毂直径/m	5.6	变速箱增速比	50
轮毂高度/m	119	最大叶尖速度/ $m\cdot s^{-1}$	90
额定风速/ $m\cdot s^{-1}$	11.4	风轮质量/kg	227 962
切入、切出风速/ $m\cdot s^{-1}$	4/25	机舱质量/kg	446 036

1.3 潮流能水轮机参数

潮流能水轮机采用由美国 Sandia 国家实验室设计的 550 kW 双叶片机型^[18]。水轮机叶轮和轮毂直径分别为 20 和 2 m,叶片设计流速和转速分别为 2 m/s 和 11.5 r/min,水轮机主要参数如表 3 所示。

表 3 潮流能水轮机主要设计参数

Tab.3 Main design parameters of tidal turbine

参 数	数 值	参 数	数 值
额定功率/kW	550	叶轮直径/m	20
切入流速/ $m\cdot s^{-1}$	0.5	轮毂直径/m	2
切出流速/ $m\cdot s^{-1}$	3.0	叶轮质量/kg	1 200
额定流速/ $m\cdot s^{-1}$	2.0	机舱质量/kg	40 100
切入转速/ $r\cdot min^{-1}$	3.0	支撑臂质量/kg	20 000
额定转速/ $r\cdot min^{-1}$	11.5	传动系统转动惯量/ $kg\cdot m^2$	4.44×10^6

2 气动 – 水动 – 伺服 – 弹性耦合模型

2.1 OpenFAST 软件简介

OpenFAST 由美国可再生实验室(NREL)开发,用于水平轴风力机气动 – 水动 – 伺服 – 弹性耦合动力学仿真。因其开源特性,在学术领域被广泛使用。OpenFAST 通过了德国劳氏船级社(Germanischer Lloyd)的检验认证。OpenFAST 主要包括气动(AeroDyn)、弹性(ElastoDyn)、水动(HydroDyn)、伺服控制(ServoDyn)和系泊(Mooring)等模块,用于计算风轮气动力、叶片动态响应和平台水动力载荷等。

CATIFES 主要调用了 OpenFAST 里气动、弹性和伺服控制 3 个模块,平台水动力和系泊动态响应则在 AQWA 软件中求解。

2.2 AQWA 软件简介

AQWA 是由 ANSYS 开发的船舶及海洋工程结构的水动力性能分析软件,具有计算精度高、界面友好等优点^[19]。AQWA 基于三维势流辐射 – 绕射理论得到平台附加质量、辐射阻尼和波浪力等频域结果,根据入射波浪,计算绕射力、波浪力和辐射力等平台载荷,结合系泊恢复力和外部载荷,通过预测/校正求解器计算平台响应。其中,用于外部载荷计算的动态链接库(user_force64. dll)在预测及校正步时均会被调用,用于传递平台运动、附加质量和对应的外部载荷。

2.3 风 – 流互补系统耦合建模

通过将 OpenFAST 气动 – 伺服 – 弹性仿真功能集成于 AQWA 外部载荷计算的动态链接库 user_force64. dll 中,结合气动耦合计算动态入流状态下的潮流能水轮机水动载荷,建立了 Spar 式风 – 流互补系统全耦合仿真模型 CATIFES。该模型各模块耦合逻辑如图 2 所示。

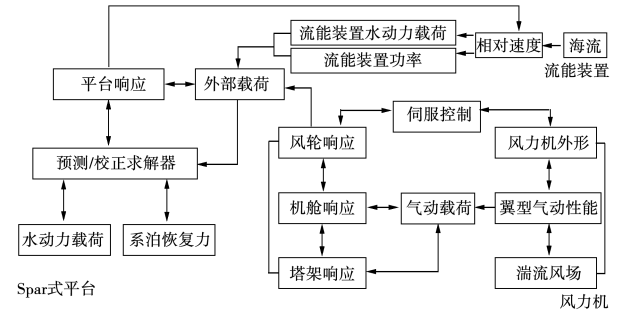


图 2 CATIFES 各模块耦合逻辑示意

Fig.2 CATIFES module coupling logic diagram

采用 CATIFES 进行风 – 流互补系统耦合仿真时平台位移、速度及加速度会传递至 user_force64. dll 中,用于求解塔架、机舱和风轮的方位、倾斜角和振动速度的运动状态参数,并基于入流风速计算气动载荷及叶片和塔架的动态响应。同时,将塔基载荷通过 user_force64. dll 传递回 AQWA 求解器,用于计算平台运动响应。类似地,平台运动响应会影响水轮机相对入流速度,同时水轮机水动载荷也会影响平台运动。

风力机和水轮机的动态响应通过动态链接库求解, Spar 平台和系统的动态响应则通过 AQWA 求解。以平台和风力机之间的耦合为例,其关键在于平台和塔基载荷的坐标变换^[20-21]。

$$E_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\theta_1 & -\sin\theta_1 \\ 0 & \sin\theta_1 & \cos\theta_1 \end{bmatrix} \tag{1}$$

$$E_y = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & 0 & \sin\theta_2 \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta_2 & 0 & \cos\theta_2 \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$E_z = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中, E_x —平台横摇欧拉角矩阵, (°); E_y —平台纵摇欧拉角矩阵, (°); E_z —平台艏摇欧拉角矩阵, (°); θ_1 —横摇, (°); θ_2 —纵摇, (°); θ_3 —艏摇, (°)。

AQWA 求解器和动态链接库产生的结果参考于不同坐标系。塔基载荷需要从平台局部坐标系转化为惯性坐标系下的载荷;用于校正叶片和塔架的平台运动需要从惯性坐标系转换为局部坐标系。公式(4)可用于实现平台运动和载荷的精确变换。

$$E = E_z E_y E_x \tag{4}$$

式中: E —欧拉角矩阵, (°)。

通过将平台参考点设置为惯性坐标系的原点,建立其局部坐标系,平台位置向量的修正如下:

$$D_{DLL} = D_{AQWA} - E \cdot P \tag{5}$$

式中: P —平台参考点到平台重心的位置向量, m; D_{AQWA} —在 AQWA 获得的平台位移向量, m; D_{DLL} —传入程序获得的平台位移向量, m。

平台的平移速度向量如下:

$$U = U_{curr} - U_{sur} - (Z_{tid} - Z_{ptf})U_{pit} + (Y_{tid} - Y_{ptf})U_{yaw} \tag{6}$$

式中: U —潮流能发电机轮毂处定义の入流速度, m/s; U_{sur} —平台纵荡速度, m/s; U_{pit} —纵摇速度, (°)/s; U_{yaw} —艏摇速度, (°)/s; Z_{tid} —潮流能发电机的垂向重心坐标, m; Z_{ptf} —平台的垂向重心坐标, m; Y_{tid} —潮流能发电机的横向重心坐标, m; Y_{ptf} —平台的横向重心坐标, m。

速度向量修正如下:

$$U_{DLL} = U_{AQWA} - E \cdot P \times \omega \tag{7}$$

式中: U_{AQWA} —AQWA 中获得的平台速度向量, m/s; U_{DLL} —DLL 中使用的速度向量, m/s; ω —AQWA 中获得的平台旋转速度向量, (°)/s。

DLL 中得到的塔基载荷变换如下:

$$F_{AQWA} = E^{-1} \cdot F_{DLL} \tag{8}$$

$$M_{AQWA} = E^{-1} \cdot (M_{DLL} - P \times F_{DLL}) \tag{9}$$

式中: F_{AQWA} —AQWA 的位移矢量, m/s; F_{DLL} —DLL 中的位移矢量, m/s; E^{-1} — E 的逆矩阵, (°); M_{AQWA} —相对于惯性坐标系作用在平台质心的力矩矢量, N·m; M_{DLL} —相对于平台局部坐标系作用在塔基上的力矩矢量, N·m。

3 结果分析

通过 CATIFES 软件计算水轮机安装于平台不同位置时风-流互补系统在湍流风、非规则波和海流共同作用下的动力学响应,并与 Spar 式风力机相关结果进行比较。湍流风平均速度为 11.4 m/s,波浪的有义波高为 2 m,谱峰周期为 10 s,采用 JONSWAP 波谱定义不同波频的能量密度,海流速度为 2 m/s。为了获得较为准确的结果,仿真时长 6 500 s,时间步长 0.005 s。为避免瞬态响应的影响,选取 500 ~ 6 500 s 结果进行统计学分析。

3.1 平台运动

表 4 为无水轮机和水轮机安装于不同位置时平台纵摇的统计值。可以看到,当安装深度为 -70 m 时,纵摇平均值从 8.30°变为 8.29°,几乎无变化;当安装深度为 -90 m 时,平均值降低至 7.82°,降低幅度为 5.78%;当安装深度为 -110 m 时,平均值降低至 7.34°,降低幅度达 11.57%。

表 4 不同系统纵摇比较(°)

Tab.4 Comparison of pitch motions of different system(°)

安装深度	最大值	最小值	平均值	标准差
无水轮机	11.78	3.17	8.30	1.60
-70 m	12.70	3.28	8.29	1.61
-80 m	12.50	3.02	8.06	1.61
-90 m	12.25	2.74	7.82	1.61
-100 m	12.00	2.49	7.58	1.62
-110 m	11.91	2.19	7.34	1.62

从表中可以看出,风-流互补系统平台的纵摇

平均值更小。增加水轮机之后平台纵摇的平均值出现减小的趋势,水轮机安装位置越深,纵摇降低的程度越大。这主要是因为水轮机推力作用点位于平台重心下方,与风力机推力作用点刚好相反,所以一定程度降低了平台纵摇的平均值。还需要注意的是,潮流能水轮机提供的反向面外弯矩会降低平台纵摇的最小值。当水轮机安装于 -110 m 时,平台纵摇最小值为 2.19° ,而无水轮机时对应的最小值为 3.17° ,平台纵摇平均值最小,且纵摇变化范围相对较小,说明水轮机安装于这一位置时,风 – 流互补系统的纵摇响应最佳。

3.2 系泊张力

图 3 比较了无水轮机和水轮机安装于不同位置时,张力的时域变化情况。系泊 1 为背风向,系泊 2 和系泊 3 为迎风向系泊。由于多能互补系统水平推力更大,平台纵向运动更大,系泊拉伸程度较紧,所以迎风系泊张力更大。当平台因纵向运动靠近背风向系泊时,悬链线系泊处于松弛状态,张力会相对减小。

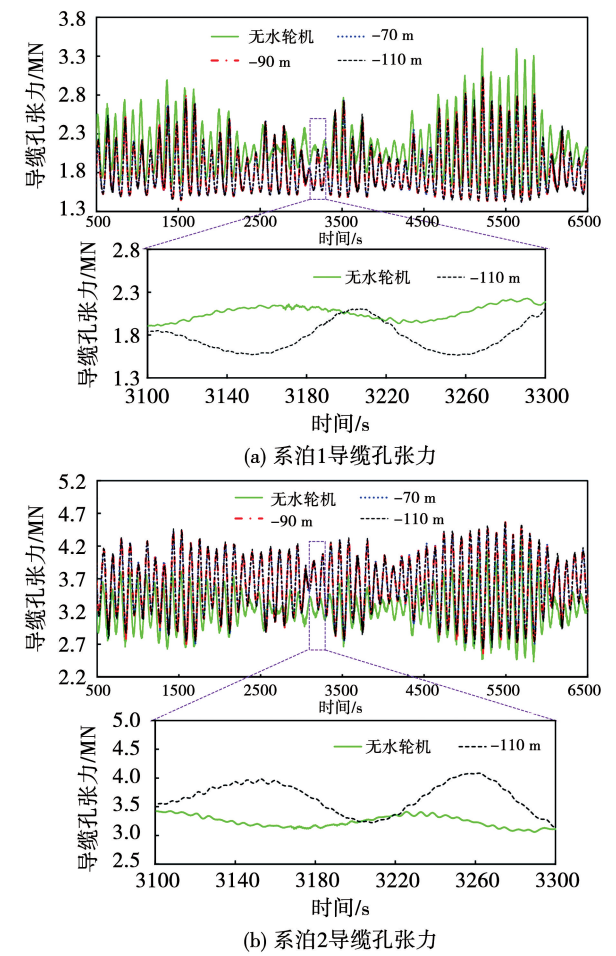


图 3 系泊张力比较

Fig. 3 Comparison of mooring tensions

表 5 给出了无水轮机和水轮机安装于不同位置时风 – 流互补系统系泊受到张力统计值。从表中可知,安装水轮机后,背风向系泊 1 张力最大值、平均值和标准差均小于无水轮机时的系泊张力,而迎风向系泊 2 和系泊 3 的张力则相对更大。由于系泊 2 与系泊 3 位置关于风向对称,因此,其张力的变化趋势大致相同。比较无水轮机与安装位置为 -90 和 -110 m 的结果发现,系泊 1 张力最大值和平均值分别下降 10.00% , 11.79% 和 10.59% , 11.79% ;系泊 2 和系泊 3 张力平均值分别增大 10.77% 和 10.46% 。

表 5 系泊张力统计值 (MN)

Tab. 5 Mooring tension statistics (MN)

系泊	统计指标	无水轮机	安装位置/m			
			- 70	- 90	- 100	- 110
1	最大值	3.40	2.98	3.06	3.06	3.04
	平均值	2.12	1.86	1.87	1.87	1.87
	标准差	0.33	0.30	0.31	0.31	0.31
2	最大值	4.37	4.54	4.56	4.57	4.57
	平均值	3.25	3.59	3.60	3.60	3.60
	标准差	0.31	0.41	0.42	0.42	0.43
3	最大值	4.20	4.48	4.50	4.51	4.51
	平均值	3.25	3.59	3.59	3.59	3.59
	标准差	0.31	0.42	0.42	0.42	0.43

3.3 多能互补系统功率

表 6 比较了水轮机安装于不同位置时风力机输

出功率。无水轮机时,风力机平均输出功率为 9.06 MW。安装水轮机后,风力机输出功率相对更大,其中水轮机安装于 -110 m 时功率输出最大,为 9.11 MW,增大了 0.55%。这一结果表明,安装水轮机可以略微提升风电机组的发电性能。

表 6 风力机输出功率比较

Tab. 6 Comparison of wind turbine output power

安装深度/m	平均值/MW
无水轮机	9.06
-70	9.08
-80	9.08
-90	9.09
-100	9.10
-110	9.11

图 4 为 3 种 10 MW 风 - 流互补系统和无水轮机输出功率的时域变化情况。

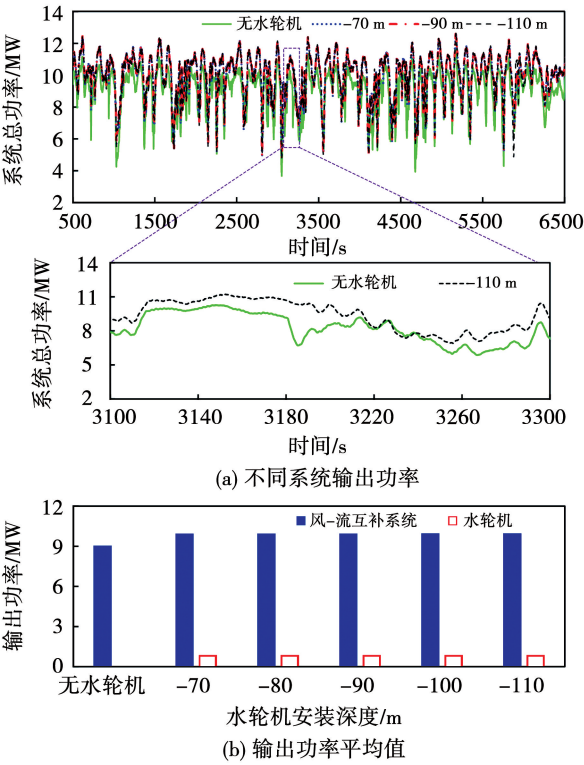


图 4 系统输出功率比较

Fig. 4 Comparison of system output power

从图 4(a) 中可以看出,当水轮机安装位置为 -70 m 时,功率最大值和平均值增大至 12.62 和 9.96 MW,增大比例为 7.75% 和 9.93%;当安装位置调整为 -90 和 -110 m 时,系统输出功率平均值为 9.97

和 9.98 MW,增加比例达 10.04% 与 10.15%。增加两台水轮机后系统的输出功率出现增大趋势。图 4(b) 为无水轮机和不同安装位置风 - 流系统输出功率平均值,随着安装深度加大,每个水轮机的输出功率出现细微减小的趋势,但是变化并不明显。综合考虑风 - 流互补与水轮机的输出功率平均值和标准差,当水轮机安装在 -110 m 时,系统整体输出功率最佳。

4 结 论

基于 AQWA 和 OpenFAST 建立了浮式风 - 流互补系统全耦合仿真模型,计算了 Spar 式 10 MW 风力机与两台 550 kW 潮流能水轮机组合的风 - 流互补系统的动态响应,分析了水轮机安装于不同位置时平台运动、系泊张力和功率输出特性。得到以下主要结论:

- (1) 在不同位置安装水轮机对平台运动变化影响的趋势一样,但是变化幅度不同。随着水轮机安装深度的加大,纵摇平均值不断减小。
- (2) Spar 式风 - 流互补系统的迎风向系泊承受更大载荷,较之于无水轮机系泊,张力平均值最多增大 10.77%,背风向系泊张力至少下降 11.79%。
- (3) Spar 式和风 - 流互补系统的风力机输出功率平均值差别不大,无水轮机系统的平均功率是 9.06 MW,不同类型的风 - 流互补系统总功率为 9.96 MW 以上,输出功率提升 9.93% 以上。
- (4) 综合比较不同位置安装两台潮流能水轮机对 Spar 风 - 流互补系统的影响,当安装深度为 -110 m 时能获得较理想的结果。

参考文献:

[1] 周国龙,叶 舟,成 欣,等.垂荡板对传统 Spar 平台水动力特性的影响[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):143-148.
ZHOU Guolong, YE Zhou, CHENG Xin, et al. Influence of heave plate on hydrodynamic characteristics of traditional spar platform [J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2015, 26(4):143-148.

[2] SI Y, KARIMI H R, GAO H. Modelling and optimization of a passive structural control design for a spar-type floating wind turbine [J]. Engineering Structures, 2014, 69:168-182.

[3] 丁勤卫,李 春,王东华,等.螺旋侧板对漂浮式风力机平台动态响应的影响[J].动力工程学报,2016,36(8):629-637.

- DING Qinwei, LI Chun, WANG Donghua, et al. Effects of helical strake on dynamic response of the platform for floating wind turbines[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2016, 36(8): 629–637.
- [4] CHEN J, HU Z, FEI D. Comparisons of dynamical characteristics of a 5 MW floating wind turbine supported by a spar-buoy and a semi-submersible using model testing methods[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2018, 10(5): 053311. 1–053311. 22.
- [5] 郭翼泽, 王晓东, 潘其云, 等. 风剪切与平台纵摇对漂浮式风电机组气动失谐的影响[J]. 风机技术, 2022, 64(3): 44–51.
- GUO Yize, WANG Xiaodong, PAN Qiyun, et al. Effect of wind shear and platform pitch motion on aerodynamic mistune of floating offshore wind turbine[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2022, 64(3): 44–51.
- [6] 王 博, 丁勤卫, 李 春, 等. 风波耦合作用下新型多浮体平台动态响应研究[J]. 振动与冲击, 2021, 40(22): 194–202.
- WANG Bo, DING Qinwei, LI Chun, et al. Dynamic responses of a new type of multi floating platform under the coupling effect of wind and wave[J]. Journal of Vibration and Shock, 2021, 40(22): 194–202.
- [7] 白雪峰, 王晓东, 赵庆旭, 等. 平台运动对漂浮式风电机组气动功率和推力的影响研究[J]. 风机技术, 2022, 64(2): 39–47.
- BAI Xuefeng, WANG Xiaodong, ZHAO Qingxu, et al. Influence of platform motion on aerodynamic power and thrust of floating wind turbine[J]. Chinese Journal of Turbomachinery, 2022, 64(2): 39–47.
- [8] MENG Long, ZHOU Tao, HE Yanping, et al. Concept design and coupled dynamic response analysis on 6 MW spar-type floating offshore wind turbine[J]. China Ocean Engineering, 2017, 31(5): 567–577.
- [9] XUE W. Design numerical modelling and analysis of a spar floater supporting the DTU 10 MW wind turbine. [D]. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology, 2016.
- [10] AI M, FONTANELLA A, DAAN V, et al. Feed forward control for wave disturbance rejection on floating offshore wind turbines[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1618(2): 022048.
- [11] 胡天龙. 基于等效梁基础模型的海上风机基础动力响应研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
- HU Tianlong. Dynamic response analysis of offshore wind turbine foundation based on apparent fixity model[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [12] WANG S, NEJAD A R, BACHYNSKI E E, et al. Effects of bed-plate flexibility on drivetrain dynamics: Case study of a 10 MW spar type floating wind turbine[J]. Renewable Energy, 2020, 161: 808–824.
- [13] 周斌珍, 胡俭俭, 谢 彬, 等. 风浪联合发电系统水动力学研究进展[J]. 力学学报, 2019, 51(6): 1641–1649.
- ZHOU Binzhen, HU Jianjian, XIE Bin, et al. Research progress in hydrodynamics of wind-wave combined power generation system[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2019, 51(6): 1641–1649.
- [14] WAN L, GAO Z, MOAN T. Experimental and numerical study of hydrodynamic responses of a combined wind and wave energy converter concept in survival modes[J]. Coastal Engineering, 2015, 104: 151–169.
- [15] MICHELE S, RENZI E, PEREZCOLLAZO C, et al. Power extraction in regular and random waves from an OWC in hybrid wind-wave energy systems[J]. Ocean Engineering, 2019, 191: 106519. 1–106519. 13.
- [16] 高 杰. 潮流能风能互补发电装置载荷及运动响应研究[D]. 舟山: 浙江海洋大学, 2016.
- GAO Jie. Study on load and motion response of tidal current energy wind energy complementary power generation device [D]. Zhoushan: Zhejiang Ocean University, 2016.
- [17] YANG Y, BASHIR M, WANG J, et al. Performance evaluation of an integrated floating energy system based on coupled analysis[J]. Energy Conversion and Management, 2020, 223: 113308. 1–113308. 15.
- [18] 杨 阳, 李 春, 张万福, 等. 抗震风力机结构设计载荷需求研究[J]. 机械工程学报, 2018, 54(16): 204–211.
- YANG Yang, LI Chun, ZHANG Wanfu, et al. Research on loading demands of structure design for aseismatic wind turbines[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(16): 204–211.
- [19] 胡 毅, 胡紫剑, 刘元丹, 等. 基于 AQWA 的大型 LNG 船码头系泊分析[J]. 舰船科学技术, 2012, 34(2): 70–73.
- HU Yi, HU Zijian, LIU Yuandan, et al. Analysis of the large LNG ships moored against a quay based on AQWA [J]. Ship Science and Technology, 2012, 34(2): 70–73.
- [20] YANG Y, BASHIR M, MICHAELIDES C, et al. Development and application of an aero-hydro-servo-elastic coupling framework for analysis of floating offshore wind turbines[J]. Renewable Energy, 2020, 161(23): 606–625.
- [21] YANG Y, BASHIR M, JIN W, et al. Wind-wave coupling effects on the fatigue damage of tendons for a 10 MW multi-body floating wind turbine[J]. Ocean Engineering, 2020, 217: 107909. 1–107909. 16.

(姜雪梅 编辑)