

# 基于土壤阻尼曲线的海上风电机组响应分析

田 德, 陈 静, 陶立壮, 罗 涛, 邓 英

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘 要:** 以 NREL 5 MW 单桩式海上风电机组为研究对象, 基于  $p$ - $y$  曲线法与土壤阻尼曲线建立有限元模型, 通过自由振动分析与时域仿真分析, 分别获得基于土壤阻尼曲线的海上风电机组结构响应。结果表明: 支撑结构土壤阻尼对土壤剪应变较为敏感, 且在自由振动分析结果额定条件下达到最大值 1.259%; 相比塔顶位移与转角, 泥面位移与转角最大值对土壤阻尼响应更为敏感。在设计过程中, 考虑土壤材料阻尼时, 可选择土壤阻尼曲线用于土壤建模。

**关键词:** 海上风电机组; 有限元分析; 土壤结构相互作用; 阻尼

**中图分类号:** TK83

**文献标识码:** A

## 0 引 言

相比陆上风电机组, 海洋环境较为复杂, 海上风电机组受到风、波浪、海流等载荷同时作用。在机组设计过程中, 需对其进行结构响应分析, 确保机组在整个生命周期中安全运行。随着水深的增加, 单桩式海上风电机组响应对土壤刚度与阻尼更为敏感<sup>[1]</sup>, 支撑结构作为海上风电机组关键承载部件, 工作条件下的结构响应特性关系着整个机组的运行安全。

为确保海上风电机组安全有效的工作运行并且获得准确的设计载荷, 需研究土壤材料阻尼对海上风电机组支撑结构响应的影响。Bisoi 等<sup>[2]</sup>应用非线性弹簧方法( $p$ - $y$  曲线法)模拟桩土作用, 对粘土中海上风电机组进行结构响应敏感性分析。Carswell<sup>[1]</sup>应用有限元法结合集中参数模型(LPM), 分析极限工况下土壤材料阻尼对海上风电机组响应的影响。Chen 等<sup>[3]</sup>应用土壤阻尼曲线结合自由振动分析, 研究不同工况下土壤材料阻尼对结构阻尼的影响。Markou 等<sup>[4]</sup>研究不同土壤模型对海上风电机组结构响应的影响。Hemmati 等<sup>[5]</sup>应用有限元模型, 分析指定土壤材料阻尼条件下机组在工作状态下的结构响应。

为了研究土壤材料阻尼对单桩式海上风电

机组支撑结构响应影响, 以 NREL 5 MW 单桩式海上风电机组为研究对象, 基于  $p$ - $y$  曲线法与土壤阻尼曲线建立有限元模型, 通过自由振动分析与时域仿真分析, 获得土壤材料阻尼对机组结构响应影响。

## 1 土壤模型

为了研究土壤材料阻尼对机组结构响应的影响, 选用非线性  $p$ - $y$  曲线法与阻尼器组合方法模拟土层属性(见图 1a)。 $p$ - $y$  曲线法基于美国石油协会(API)推荐的  $p$ - $y$  曲线<sup>[6]</sup>, 在基础竖向上, 用分散的非线性弹簧代替土层在水平方向的刚度属性。API-RP2A-WSD 标准<sup>[6]</sup>定义砂土地中不同深度位置的  $p$ - $y$  曲线由式(1)计算:

$$p = A \times p_u \times \tanh\left(\frac{k \times H}{A \times p_u} \times y\right) \quad (1)$$

式中,  $p$ ——水平桩周土反力, kN/m;  $y$ ——水平位移, m;  $p_u$ —— $H$  深度处桩周土极限水平抗力, kN/m;  $k$ ——地基反力初始模量, 由土层属性决定, kN/m<sup>3</sup>;  $A$ ——考虑循环或静载荷条件的因素系数, 静载荷时由式(2)计算(随着深度的增加, 当不等式左侧小于 0.9 时, 均取值 0.9):

$$A = \left(3.0 - 0.8 \frac{H}{D}\right) \geq 0.9 \quad (2)$$

桩周土极限水平抗力  $p_u$  在浅水  $p_{us}$  与深水  $p_{ud}$

收稿日期: 2019-04-18

基金项目: 国家科技支撑计划(2009BAA22B02)

通信作者: 田 德(1958—), 男, 博士、教授、博士生导师, 主要从事风力发电系统理论与技术方面的研究。tdncepu@163.com

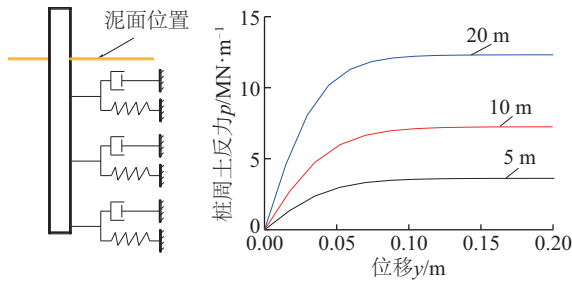
中分别由式(3)、式(4)计算:

$$p_{us} = (C_1 \times H + C_2 \times D) \times \gamma \times H \quad (3)$$

$$p_{ud} = C_3 \times D \times \gamma \times H \quad (4)$$

式中,  $C_1$ 、 $C_2$ 、 $C_3$ ——系数, 根据 API 标准结合内摩擦角确定;  $D$ ——桩直径, m;  $\gamma$ ——土壤有效重度,  $\text{kN/m}^3$ 。

由于单桩式海上风电机组通常安装在水深 0~25 m 的海域, 因此, 选用式(3)计算桩周土极限水平抗力。图 1 为  $p$ - $y$  基础模型及在 5、10、20 m 深度处  $p$ - $y$  曲线。



a.  $p$ - $y$  基础模型

b. 不同深度处  $p$ - $y$  曲线

图 1  $p$ - $y$  基础模型与不同深度处  $p$ - $y$  曲线

Fig. 1  $p$ - $y$  foundation model and  $p$ - $y$  curves of different depth

土壤阻尼主要由辐射阻尼与土壤材料阻尼组成, 当激振频率小于 1 Hz 时, 辐射阻尼可忽略不计<sup>[3]</sup>, 由于风和波浪荷载频率较低(最高频率分别为 0.20 和 0.80 Hz)<sup>[7]</sup>, 支撑结构在工作过程中的主要频率为支撑结构一阶频率(0.25 Hz)与 3 倍转频(3P, 0.6 Hz), 因此只考虑土壤材料阻尼对结构的影响。为了获得土壤材料阻尼对支撑结构阻尼的影响, 土壤材料阻尼由阻尼单元实现, 阻尼系数  $c$  由式(5)计算<sup>[8]</sup>:

$$c = \frac{2k\xi}{\omega} \quad (5)$$

式中,  $k$ ——局部土体弹簧刚度,  $\text{kN/m}^3$ ;  $\xi$ ——材料阻尼比;  $\omega$ ——激励角频率,  $\text{rad/s}$ 。其中,  $k$  值由非线性  $p$ - $y$  曲线计算, 见式(6):

$$k = \frac{p(z, t)}{y(z, t)} \quad (6)$$

式中,  $z$ ——土壤深度, m。

由文献[3]可知, 土壤材料阻尼与土壤的剪应变有关, 在无明确的土壤材料阻尼数据条件下, 选用 Darendeli<sup>[9]</sup>推荐的标准化材料阻尼曲线(见图 2)模拟土壤材料阻尼与土壤的剪应变关系, 此处忽略围压变化对土壤材料阻尼的影响, 围压取 1 个大气压。阻尼曲线的形状取决于塑性指数(Plasticity

Index, PI) 与超固结比(Over Consolidation Ratio, OCR), 对于砂土地中海上风电机组, PI 取值为 0, OCR 取值为 1。为了获得土壤材料阻尼, 需要确定土壤剪应变  $\gamma_e$ , Gazetas 等<sup>[8]</sup>指出剪应变可由式(7)计算:

$$\gamma_e = \frac{1+\nu}{2.5D} y(z, t) \quad (7)$$

式中,  $\nu$ ——土壤泊松比;  $y(z, t)$ ——桩基础在水平方向运动幅值。

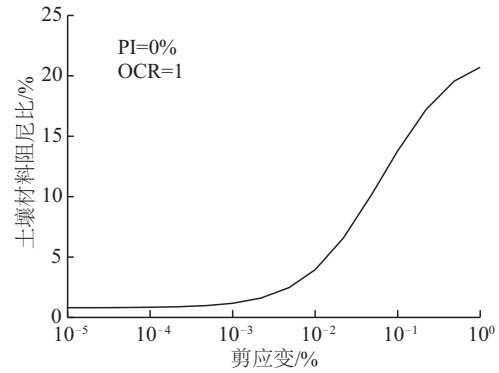


图 2 标准化土壤阻尼曲线

Fig. 2 Normalized soil material damping curves

## 2 结构载荷

### 2.1 气动载荷

应用叶素动量理论计算机组工作过程中风轮受到湍流风的气动载荷, 考虑叶尖与轮毂损失、动态失速等影响, 将叶片沿展向分为若干叶素, 假设不同叶素之间无气动干扰, 每个叶素上的载荷单独计算。由于机组在工作过程中是旋转的, 则每个叶素上的相对风速为<sup>[10]</sup>:

$$v_0 = \sqrt{(1-a)^2 v_1^2 + (1+b)^2 (\Omega r)^2} \quad (8)$$

式中,  $v_1$ ——来流风速,  $\text{m/s}$ ;  $a$ 、 $b$ ——轴向与切向诱导因子;  $\Omega$ ——风轮旋转角速度,  $\text{rad/s}$ ;  $r$ ——叶素到风轮中心距离, m。叶素段上受到的局部法向力与切向力为:

$$dF_n = \frac{1}{2} \rho c v_0^2 C_n dr \quad (9)$$

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho c v_0^2 C_t dr \quad (10)$$

式中,  $\rho$ ——空气密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $c$ ——叶素弦长, m;  $C_n$ 、 $C_t$ ——法向力系数和切向力系数。

### 2.2 风载荷

根据 IEC 61400-1 标准推荐<sup>[11]</sup>, 选择 Kaimal 谱

用于脉动风速的功率谱密度函数,考虑风切变影响,结构上的风载荷应用式(11)计算:

$$F(z)=\frac{1}{2}\rho C_{D,T}D(z)v^2(z) \tag{11}$$

式中,  $C_{D,T}$ ——支撑结构阻力系数;  $D(z)$ ——支撑结构在  $z$  高度处的外径, m;  $v(z)$ —— $z$  高度处的风速, m/s。

### 2.3 波浪载荷

为了计算作用在结构上的波浪力,根据 DNV-OS-J101<sup>[12]</sup>标准规定,结构直径  $D$  与波浪波长  $\lambda$  满足  $D\leq 0.2\lambda$  时,可使用 Morison 方程计算波浪载荷。

$$F_{wave}(z)=\frac{1}{4}\rho_w\cdot\pi\cdot D^2\cdot C_M\cdot\dot{u}(z,t)+\frac{1}{2}\rho_w\cdot D\cdot C_D\cdot u(z,t)\cdot|u(z,t)| \tag{12}$$

式中,  $\rho_w$ ——水密度, 1025 kg/m<sup>3</sup>;  $C_M$ 、 $C_D$ ——惯性与阻力系数;  $u(z,t)$ 、 $\dot{u}(z,t)$ ——水平方向波浪的速度与加速度分量。

### 2.4 仿真工况

海上环境较为复杂,对额定状态下海上风电机组进行时域仿真,风与海浪具体数值见表 1。其中,湍流风模型选为正常湍流模型(NTM)下的 Kaimal 风谱,波浪选为具有更高的峰值与更窄且常用于极端事件分析的 Jonswap 谱<sup>[13]</sup>。

表 1 仿真工况

Table 1 Case of simulation

工况	$U_s/\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	$H/\text{m}$	$T_p/\text{s}$
LC1(Operation)	11.4	1.26	6.20

## 3 仿真分析

以 NREL 5 MW(基本参数见表 2<sup>[15]</sup>)近海单桩

表 2 NREL 5 MW 风电机组基本参数

Table 2 Basic parameter of wind turbine

名称	数值	名称	数值
额定功率/MW	5	切出风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	25
风电机组等级	B	风轮与机舱质量/t	350
叶片数量	3	塔顶高度/m	87.6
风轮直径/m	126	塔基高度/m	10
额定风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	11.4	水深/m	20
额定转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	12.1	基础埋深/m	36
切入风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3	基础厚度/mm	60

式风电机组为例,应用 NREL 开发的开源软件 FAST<sup>[14]</sup>进行模拟仿真,通过对表 1 所选工况进行计算,获得支撑结构在复杂海洋环境下受到的外部载荷,用于有限元模型。

### 3.1 有限元模型

应用有限元软件 Abaqus 进行仿真分析,有限元模型以泥面为界限分为 2 部分建模,通过 tie 连接,泥面以上部分,选择 S4 壳单元,风轮与机舱以质量点的形式固定在塔顶上方,考虑到外部风载荷与波浪载荷为分布载荷,在泥面以上支撑结构上选取 11 个截面施加对应的等效的载荷时间序列。泥面以下土壤中基础模型选择 B31 梁单元,土壤由一组水平方向的非线性弹簧-阻尼器单元代替(图 1a),其一端与基础相连,一端为固定约束,非线性弹簧-阻尼器间隔为 1 m<sup>[2]</sup>。土层参数参考文献[16],具体见表 3。为确定模型桩是否满足临界插入深度,在桩顶施加极限载荷,桩身变形曲线满足 vertical-tangent 准则<sup>[17]</sup>,即符合设计要求,可用于后续仿真分析。

表 3 砂土属性

Table 3 Properties of sand

土层 深度/m	容重/ $\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$	内摩擦 角/( $^{\circ}$ )	地基模量/ $\text{MN}\cdot\text{m}^{-3}$
0~36	10	33	16.3

### 3.2 自由振动分析

通过自由振动分析,获得不同条件下土壤材料阻尼对结构整体阻尼的影响,此处忽略风轮气动阻尼与水动力阻尼,只考虑支撑结构的结构阻尼与土壤材料阻尼,其中,对于不同载荷条件需要通过调节瑞利阻尼系数保持支撑结构的结构阻尼比为 1%<sup>[3]</sup>。海上风电机组在工作过程中,塔顶位移在额定风速附近达到最大,为研究土壤材料阻尼对结构阻尼影响,通常由时域仿真的塔顶位移时间序列中值结合自由振动分析获得<sup>[3]</sup>,由图 5 可知考虑桩土作用的塔顶位移均值为 0.6 m,为研究土壤材料阻尼与剪应变关系,在塔顶位置施加 0.2、0.4 和 0.6 m 位移约束进行自由振动分析。自由振动分析过程具体分为 2 步:1)施加重力载荷,并在塔顶位置施加固定位移约束;2)释放固定位

移约束。图 3 为塔顶位移自由振动曲线。结合对数衰减法计算支撑结构整体结构阻尼比,具体计算过程见式(13)、式(14),表 4 为计算结果。可看出,随着塔顶位移的增加,土壤材料阻尼对结构阻尼影响变大,这是因为随着塔顶位移的增加,桩基础在土中位移相应增加,结合图 2 可知,土壤材料阻尼比增加,即支撑结构土壤阻尼对剪应变较为敏感。而在塔顶位移约束为 0.6 m 时,土壤阻尼达到最大值 1.259%。综上,在分析土壤材料阻尼对结构响应影响时,不能忽略剪应变对土壤材料阻尼的影响。

$$\delta = \frac{1}{n} \ln \left( \frac{A_i}{A_{i+n}} \right) \quad (13)$$

$$\xi = \frac{1}{\sqrt{1 + (2\pi/\delta)^2}} \quad (14)$$

式中,  $\delta$  ——对数衰减量;  $A_i$ 、 $A_{i+n}$  ——第  $i$ 、 $i+n$  次振荡的振幅。

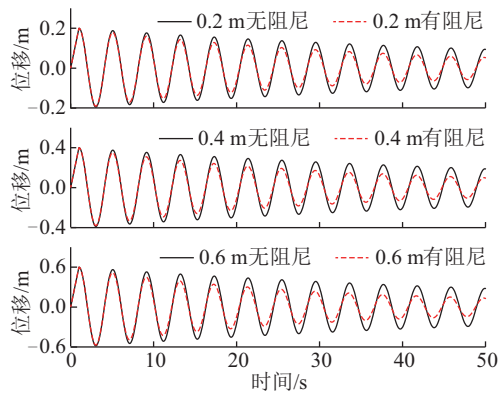


图 3 自由振动曲线

Fig. 3 Free vibration curves

表 4 自由振动分析

Table 4 Results of free vibration

位移/m	0.2	0.4	0.6
整体阻尼/%	1.748	2.025	2.259
土壤阻尼/%	0.748	1.025	1.259

### 3.3 时域仿真分析

海上风电机组在工作过程中的载荷主要来自风载荷与波浪载荷,图 4 为塔顶位置力与力矩的载荷时程曲线。以下从位移、转角、力以及力矩 4 个角度,分析土壤材料阻尼对单桩式海上风电机组支撑结构响应影响。

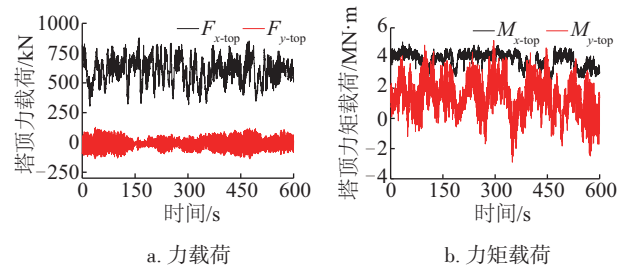
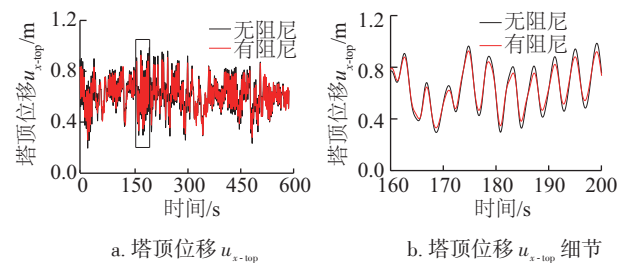


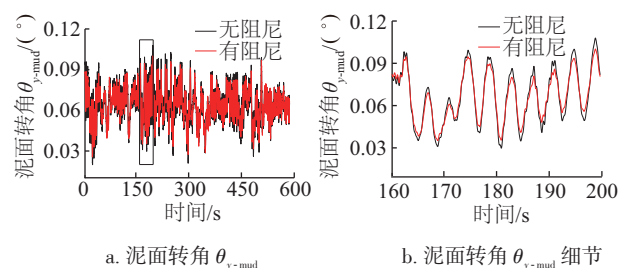
图 4 塔顶载荷时程曲线

Fig. 4 Load time history at top of tower

海上风电机组的大型化,使得支撑结构变得更高更柔,在工作过程中的振动也相应增加。考虑到土壤属性的复杂性,为防止发生叶尖打塔,保证机组安全高效运行,在设计过程中应考虑土壤阻尼对塔顶位移响应的影响。图 5a、5b 为塔顶位移  $u_{x-top}$  时程曲线及其细节图,可看出土壤阻尼对塔顶位移影响较为明显。

图 5 塔顶位移  $u_{x-top}$  时程曲线Fig. 5 Tower top displacement  $u_{x-top}$  time history

在保证机组安全运行时,还需限制基础在泥面处转角,防止转角过大,造成上部结构剧烈振动<sup>[18]</sup>。海上风电机组设计中基础顶部允许的最大转角为  $0.5^\circ$ 。但考虑到建设过程中产生的转角公差,基础顶部允许的最大转角为  $0.25^\circ \sim 0.30^\circ$ <sup>[19]</sup>。图 6a、6b 为泥面转角  $\theta_{y-mud}$  时程曲线及其细节图,与塔顶位移响应结果相似。

图 6 泥面转角  $\theta_{y-mud}$  时程曲线Fig. 6 Mudline tilt  $\theta_{y-mud}$  time history



海上风电机组在工作环境复杂,支撑结构作为机组的承载结构,其基础部分不仅用于支撑整体结构的重力载荷,还用于抵抗风浪联合作用下倾覆力矩,防止基础过度倾斜,因此泥面位置载荷关系到整个机组的安全运行<sup>[18]</sup>。图7所示为泥面位置剪力 $F_x$ 与力矩 $M_y$ 载荷。可看出相比泥面剪力,土壤阻尼对泥面弯矩载荷影响更为显著,与文献[1]结论一致。

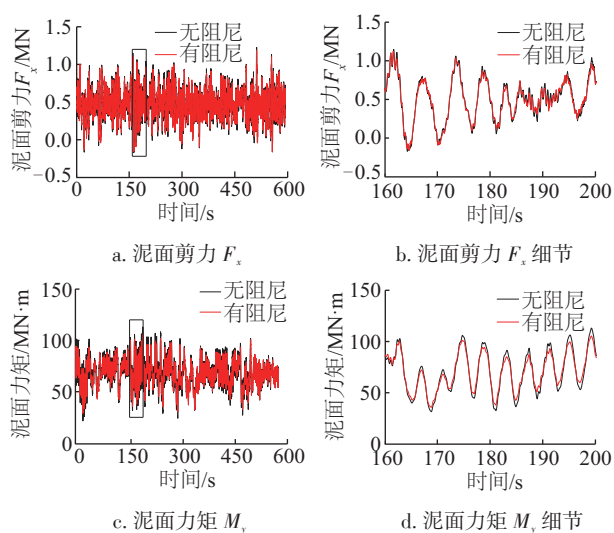


图7 泥面剪力 $F_x$ 与力矩 $M_y$ 时程曲线

Fig. 7 Mudline shear force  $F_x$  and bending moment  $M_y$  time history

表5为支撑结构响应最大值与标准差的统计数据。考虑土壤材料阻尼会在不同程度上降低响应数值,整体响应变化规律符合文献[3]。

表5 响应统计数据

Table 5 Statistical data of response

响应类型		无阻尼	有阻尼	差异/%
$F_x$ /MN	最大值	1.2258	1.1871	-3.1571
	标准差	0.2034	0.1934	-4.9164
$M_y$ /MN·m	最大值	113.0614	105.4179	-6.7605
	标准差	14.6104	12.8640	-11.9531
$u_{x-top}$ /m	最大值	0.9856	0.9263	-6.0166
	标准差	0.1290	0.1141	-11.5504
$u_{x-mud}$ /m	最大值	0.0156	0.0144	-7.6923
	标准差	0.0020	0.0018	-10.000
$\theta_{y-top}$ /(°)	最大值	0.9412	0.9056	-3.7824
	标准差	0.1239	0.1103	-10.9766
$\theta_{y-mud}$ /(°)	最大值	0.1080	0.1002	-7.2222
	标准差	0.0139	0.0122	-12.2302

相比泥面剪力 $F_x$ 最大值下降3.1571%,泥面力矩 $M_y$ 下降更为显著,下降了6.7605%;塔顶位移 $u_{x-top}$ 与泥面位移 $u_{x-mud}$ 最大值分别下降6.0166%和7.6923%,塔顶转角 $\theta_{y-top}$ 与泥面转角 $\theta_{y-mud}$ 最大值分别下降3.7824%和7.2222%,可看出泥面位置的位移与转角对土壤阻尼响应更为敏感。除去泥面剪力 $F_x$ 标准差下降4.9164%,其余各响应标准差下降在10%~13%范围内,即土壤阻尼会降低支撑结构响应波动幅值,进而影响疲劳载荷。

## 4 结 论

以NREL 5 MW单桩式海上风电机组为研究对象,基于 $p$ - $y$ 曲线法与土壤阻尼曲线建立有限元模型,通过自由振动分析与时域仿真分析,获得土壤材料阻尼对机组结构响应影响。通过分析得到以下结论:

1)基于土壤阻尼曲线,通过自由振动分析与对数衰减法,获得不同载荷条件下土壤材料阻尼对支撑结构阻尼影响,在额定条件下土壤阻尼达到最大值1.259%,不能忽略剪应变对土壤材料阻尼的影响。

2)对于额定工况下考虑土壤材料阻尼的时域仿真分析,相比塔顶位移与转角响应最大值,泥面位置的位移与转角最大值对土壤阻尼响应更为敏感。而对于泥面位置载荷,考虑土壤阻尼的泥面力矩最大值与标准差分别降低6.7605%和11.9531%。

综上所述,在设计过程中,需考虑土壤阻尼对海上风电机组支撑结构响应的影响,防止过高估计设计载荷,增加结构成本。

## [参考文献]

- [1] Carswell W, Johansson J, Løvholt F, et al. Foundation damping and the dynamics of offshore wind turbine monopiles [J]. Renewable Energy, 2015, 80: 724—736.
- [2] Bisoi S, Haldar S. Dynamic analysis of offshore wind turbine in clay considering soil-monopile-tower interaction [J]. Soil Dynamics & Earthquake Engineering, 2014, 63(1): 19—35.
- [3] Chen C, Duffour P. Modelling damping sources in monopile-supported offshore wind turbines [J]. Wind Energy, 2018, 21: 1121—1140.

- [4] Markou A A, Kaynia A M. Nonlinear soil- pile interaction for offshore wind turbines[J]. Wind Energy, 2018, 21: 558—574.
- [5] Hemmati A, Khorasanchi M, Barltrop N. Analysis of offshore wind turbine foundation with soil models [A]. International conference on ocean, offshore and arctic engineering[C], Trondheim, Norway, 2017.
- [6] API-RP2A-WSD. Recommended practice for planning, designing and constructing fixed offshore platforms-working stress design[S]. API, 2007.
- [7] Zuo Haoran, Bi Kaiming, Hao Hong. Dynamic analyses of operating offshore wind turbines including soil-structure interaction[J]. Engineering Structures, 2018, 157: 42—62.
- [8] Gazetas G, Dobry R. Horizontal response of piles in layered soils [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1984, 110(1): 20—40.
- [9] Darendeli M B. Development of a new family of normalized modulus reduction and material damping curves[D]. Austin: The University of Texas at Austin, 2001.
- [10] Hansen M O L. Aerodynamics of wind turbines. 2nd ed [M]. London: Earthscan, 2008, 46—49.
- [11] IEC 61400- 1, Ed.3: Wind Turbine- Part 1: Design requirement[S]. IEC, 2005.
- [12] DNV-OS-J101, Offshore standard for design of offshore wind turbine structures[S]. DNV, 2014.
- [13] IEC 61400- 3, Ed.1: Wind Turbines- Part 3: Design Requirements for offshore wind turbines[S]. IEC, 2009.
- [14] Jonkman J M, Buhl M L Jr. Fast user's guide-updated August 2005 [R]. National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO, Report No. NREL/TP-500-38230, 2005.
- [15] Jonkman J, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5- MW reference wind turbine for offshore system development[R]. Office of Scientific & Technical Information Technical Reports, 2009.
- [16] Abhinav K A, Saha N. Nonlinear dynamical behaviour of jacket supported offshore wind turbines in loose sand [J]. Marine Structures, 2018, 57: 133—151.
- [17] Kuo Y S, Achmus M, Abdel- Rahman K. Minimum embedded length of cyclic horizontally loaded monopiles [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2012, 138(3): 357—363.
- [18] Bhattacharya S. Challenges in design of foundations for offshore wind turbines [J]. Engineering & Technology Reference, 2014, 1(1): 1—9.
- [19] Malhotra S. Selection, design and construction of offshore wind turbine foundations[M]. Rijeka: InTech, 2011, 233—234.

## STRUCTURE RESPONSE ANALYSIS OF OFFSHORE WIND TURBINES BASED ON SOIL DAMPING CURVE

Tian De, Chen Jing, Tao Lizhuang, Luo Tao, Deng Ying

(State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,  
North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Taking NREL 5 MW monopile offshore wind turbine as a model, the finite element model is established based on  $p$ - $y$  curve method and soil damping curve. The structural response of offshore wind turbine based on soil damping curve is respectively obtained through free vibration analysis and time domain simulation analysis. The results show that the soil damping of supporting structure is sensitive to soil shear strain, the free vibration analysis results reach the maximum value 1.259% under rated conditions. Compared with the top displacement and tilt of tower, the maximums at the mudline are more sensitive to soil damping. In the design process, the soil damping curve can be selected for soil modeling considering the soil material damping.

**Keywords:** offshore wind turbines; finite element analysis; soil structure interaction; damping