

风力发电机组地震动力响应分析

彭超

(国电联合动力技术有限公司, 北京, 100039)

摘要: 建立了风力发电机组机械-气动-控制多学科联合仿真模型, 通过仿真研究了地震作用下机组的动力响应。计算结果表明, 停机动作对地震动力响应有显著影响。经对比分析, 采用振型分解反应谱法和不考虑停机动作的多体动力学方法计算的地震载荷均偏保守。该文为风力发电机组的地震载荷计算提供了一个具有参考价值的方法。

关键词: 风力发电机组; 地震动力响应; 多体动力学; 联合仿真

中图分类号: TK513.5

文献标识码: A

0 引言

风能作为重要的绿色能源, 具有储量大、可再生、永不枯竭等优点。大功率风力发电机组的塔筒高度约为 70~100 米, 属于高耸结构。在风力和地震力联合作用下, 机组安全面临着严峻挑战。机组设计时需进行地震工况下的载荷计算, 以确保塔筒的抗震能力。

目前, 工程上风机电震载荷计算多采用频域法, 即应用振型分解反应谱法计算得到塔筒各截面的地震载荷, 将塔底的地震载荷与其他重要、频发工况的极限载荷叠加, 得到地震工况下塔底的极限载荷^{[1][2]}。该方法分开计算地震作用效应与机组动态响应, 不能考虑地震作用与气动力、惯性力等因素的耦合。

一些学者^{[3][4][5][6]}采用多体动力学与地震时程分析结合的方法计算地震载荷, 但模型中没有加入控制环节。地震发生时, 机组振动剧烈, 极易因振动超限触发停机。这些研究无法仿真停机过程, 不能考虑地震作用时机组停机动作对极限载荷的影响。

本文采用 SIMPACK 建立风力发电机组多体动力学模型, AeroDyn 计算叶片和塔筒气动力, Simulink 提供外部控制器和地震加速度时程激励, 通过机械、气动、控制多学科联合仿真, 开展风力发电机组的地震动力响应分析, 提取塔筒底部的极限载荷, 指导机组的抗震设计。

1 建立模型

1.1 机组参数

本文以某 2.0MW 风力发电机组为例, 主要参数如表 1 所示:

表 1 机组参数

Table 1 Wind Turbine Parameters

参数	数值
额定功率/MW	2.0
额定风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	10
风轮额定转速/rpm	15.1
发电机额定转速/rpm	1780
发电机额定转矩/N.m	11596
名义风轮直径/m	105.5
轮毂高度/m	80
风轮质量/kg	42000
机舱质量(包含风轮)/kg	114000
整机质量/kg	188000

1.2 结构动力学模型

采用大型通用多体动力学仿真软件 SIMPACK 建立机组动力学模型。模型包含了风机的主要部件: 叶片、塔筒和传动链。叶片由专用模块“Rotor blade Generation”生成, 分段叶片, 考虑预弯。在 ANSYS 中采用 BEAM188 单元建立塔筒模型, 采用 SOLID186 单元建立主轴模型, 两者经模态缩聚后导入 SIMPACK 中以柔性体形式建立。齿轮箱传动刚度较大, 简化为一对齿轮副和壳体。齿轮箱壳体与主机架、发电机壳体与主机架之间以弹簧-阻尼单元连接, 模拟减振支撑。风机基础与大地之间添加 x 、 y 、 R_x 、 R_y 四个方向的弹簧-阻尼单元, 模拟土壤的柔性。叶片与轮毂之间采用 40 号铰接(Joint Type 40: Single Axis $u(t)$), 用于施加桨距角控制; 发电机转子与壳体之间采用 93 号力元(Force Element Type 93: Force/Torque by $u(t)$ Cmp)连接, 用于施加转矩控制。大地为假想刚体, 与绝对坐标系之间采用 40 号铰接(Joint Type 40: Single Axis $u(t)$), 用于施加地震加速度时程激励。

多体动力学模型如图 1 所示:

收稿日期:

通讯作者: 彭超(1985—), 男, 湖北荆州人, 硕士, 国电联合动力技术有限公司工程师, 主要从事风力发电机组动力学分析与载荷计算。pchao-2000@163.com

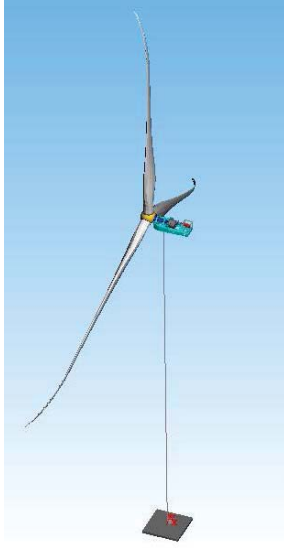


图 1 SIMPACK 动力学模型

Fig. 1 SIMPACK Dynamics Model

整个 SIMPACK 模型有 244 个自由度。
模型拓扑结构如图 2 所示：

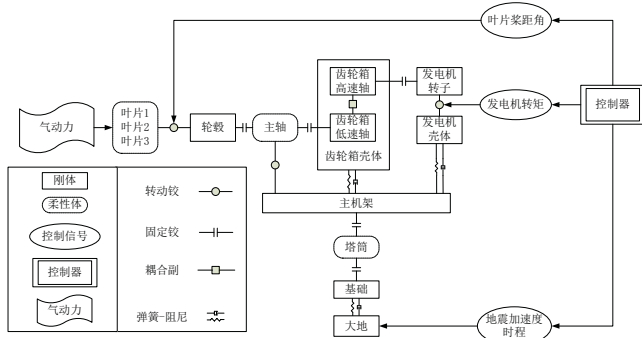


图 2 SIMPACK 模型拓扑结构

Fig. 2 The Topology of SIMPACK Model

1.3 气动力计算

气动力通过 FE241:AeroDyn V13 接口，调用美国国家能源部可再生能源实验室(NREL)开发的 AeroDyn 程序计算。

AeroDyn 是一套经过充分验证并在国际上广为认可的水平轴风力发电机气动力计算程序，其采用广义动态尾流（GDW）模型和半经验的 Beddoes-Leishman 动态失速模型，并能考虑势流绕过圆柱形塔筒形成的塔影效应^[7]。

GDW 中，诱导速度沿风轮半径、方位角方向分布的规律可以表示为：

$$\hat{u}(\hat{r}, \psi, \hat{t}) = \sum_{r=0}^{\infty} \sum_{j=r+1, r+3, \dots}^{\infty} \phi_j^r(v) [\alpha_j^r(\hat{t}) \cos(r\psi) + \beta_j^r(\hat{t}) \sin(r\psi)] \quad (1)$$

式中： \hat{r} 、 ψ 、 \hat{t} ——分别为无量纲半径、方位角

和时间； $\phi_j^r(v)$ ——径向形函数； α_j^r 、 β_j^r ——基于时间的诱导速度系数； r ——对应于方位角的谐波数； j ——对应于第 r 个谐波的形函数编号。

根据连续的无粘性不可压缩流体的压强梯度分布满足 Laplace 方程，可得 GDW 理论的主控制方程为：

$$[M^c] \left\{ \begin{matrix} \vdots \\ \alpha_j^r \\ \vdots \end{matrix} \right\} + [\tilde{L}^c]^{-1} [\tilde{V}^c] \left\{ \begin{matrix} \vdots \\ \alpha_j^r \\ \vdots \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{matrix} \vdots \\ \tau_n^{mc} \\ \vdots \end{matrix} \right\} \quad (2a)$$

$$[M^s] \left\{ \begin{matrix} \vdots \\ \beta_j^r \\ \vdots \end{matrix} \right\} + [\tilde{L}^s]^{-1} [\tilde{V}^s] \left\{ \begin{matrix} \vdots \\ \beta_j^r \\ \vdots \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2} \left\{ \begin{matrix} \vdots \\ \tau_n^{ms} \\ \vdots \end{matrix} \right\} \quad (2b)$$

式中： $[M]$ ——显式质量矩阵； $[\tilde{L}]^{-1}[\tilde{V}]$ ——入流系数矩阵； τ ——叶片的压力系数。

解该微分方程组可以得到诱导速度系数 α_j^r 和 β_j^r ，

带入方程(1)可以得到风轮上的诱导速度分布。

AeroDyn 可以考虑风切变、塔影效应、叶尖损失、轮毂损失等，并可计算塔筒上的风载。SIMPACK 与 AeroDyn 联合仿真采用实时交互的方式，可以准确模拟气弹耦合，反映气动阻尼对结构动力学响应的影响。

1.4 外部控制器

采用 MATLAB/Simulink 建立风机外部控制器，包含叶片桨距角控制、发电机转矩控制、停机控制。

叶片桨距角和发电机转矩均采用 PI 控制，输入为发电机测量转速与设定转速之差。

控制器按照转速-转矩曲线控制发电机转矩，如图 3 所示。

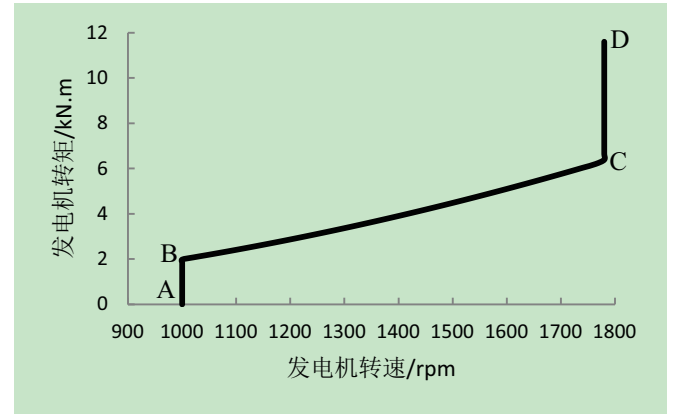


图 3 发电机转速-转矩曲线

Fig. 3 Generator Speed-Torque Curve

AB 段，发电机转速稳定在并网转速 1000rpm 附近，转矩采用 PI 控制器输出。

BC 段，风力发电机组追寻最优叶尖速比，发电机转矩为：

$$T_{gen} = K_{\lambda} \cdot \omega_{gen}^2 \quad (3)$$

其中：

$$K_{\lambda} = \pi \rho R^5 C_p(\lambda) / (2 \lambda^3 G^3) \quad (4)$$

式中： ρ ——空气密度； R ——风轮半径； λ ——设计叶尖速比； $C_p(\lambda)$ ——在叶尖速比 λ 处的功率系数； G ——齿轮箱传动比。

CD段，发电机转速稳定在额定转速1780rpm附近，转矩采用PI控制器输出。

发电机转矩达到D点后，稳定在额定转矩附近，机组达到额定功率，进入叶片桨距角控制。通过调整桨距角，改变风轮吸收的气动力扭矩，使转速稳定在额定值附近。

地震发生时，如果机舱水平振动加速度值超过限定值 0.4905m/s^2 ，将触发安全链停机，叶片恒速率顺桨，发电机转矩置为0。

SIMPACK负责动力学仿真，Simulink负责控制器仿真，两者通过SIMPACK的SIMAT接口实时交互数据，协同仿真。SIMPACK输出至Simulink的信号为三个叶片的桨距角、发电机转速和转矩、机舱振动加速度，SIMPACK接收Simulink的信号为三个叶片的桨距角、发电机转矩、高速轴刹车力矩。

1.5 地震时程激励

在本文中，地震荷载以加速度时程的形式作用于风力发电机组所处的大地上，加速度时程则依据设计加速度反应谱生成。本文采用国标《GB50011-2010 建筑抗震设计规范》^[8]（以下简称国标）中的地震动设计反应谱，如下：

$$\alpha = \begin{cases} \left[0.45 + 10T(\eta_2 - 0.45)\right] \alpha_{\max} & 0 \leq T \leq 0.1\text{s} \\ \eta_2 \alpha_{\max} & 0.1\text{s} < T \leq T_g \\ \left(\frac{T_g}{T}\right)^\gamma \eta_2 \alpha_{\max} & T_g < T \leq 5T_g \\ \left[\eta_2 0.2^\gamma - \eta_1(T - 5T_g)\right] \alpha_{\max} & 5T_g < T \leq 6\text{s} \end{cases} \quad (5)$$

式中： α ——地震影响系数； T ——线性单自由度系统自振周期； T_g ——特征周期； α_{\max} ——地震影响系数最大值； η_1 ——直线下降段的下降斜率调整系数； η_2 ——阻尼调整系数； γ ——衰减指数。

参数按下式确定：

$$\gamma = 0.9 + \frac{0.05 - \zeta}{0.3 + 6\zeta} \quad (6)$$

$$\eta_1 = \max\left(0.02 + \frac{0.05 - \zeta}{4 + 32\zeta}, 0\right) \quad (7)$$

$$\eta_2 = \max\left(1 + \frac{0.05 - \zeta}{0.05 + 1.6\zeta}, 0.55\right) \quad (8)$$

式中： ζ ——结构阻尼比。

拟定抗震设防烈度为8度，设计基本地震加速度 0.30g 。查国标表5.1.4-1，多遇地震下的水平地震影响系数最大值 α_{\max} 为0.24。II类场地，设计地震分组为第三组，查国标表5.1.4-2，特征周期 T_g 为0.45s。结构阻尼比 ζ 取为0.02。地震加速度反应谱如图4所示：

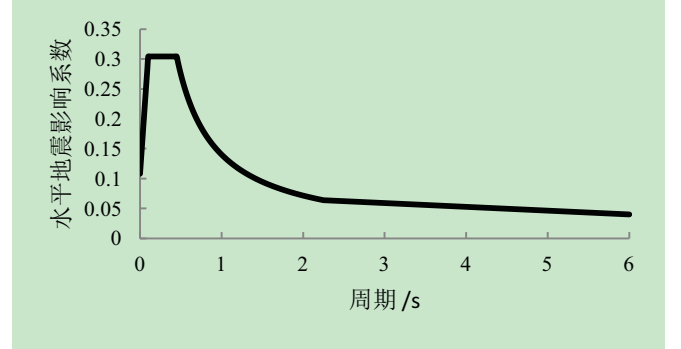


图4 地震加速度设计反应谱

Fig. 4 The Seismic Acceleration Design Response Spectrum

采用simqke_gr 2.6软件由地震加速度反应谱生成人造地震波，如图5所示。

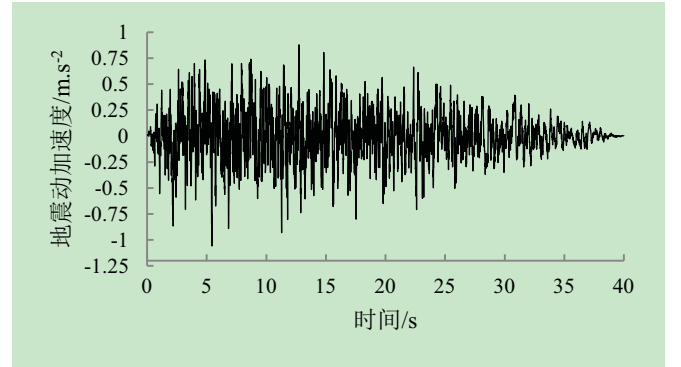


图5 地震动加速度时程

Fig. 5 The Ground Motion Acceleration Time History

采用SeismoSignal软件对人造地震波进行谱分析，回归成拟合的加速度反应谱，并与目标设计加速度反应谱进行比较。由图6可知，拟合反应谱与目标反应谱吻合较好。

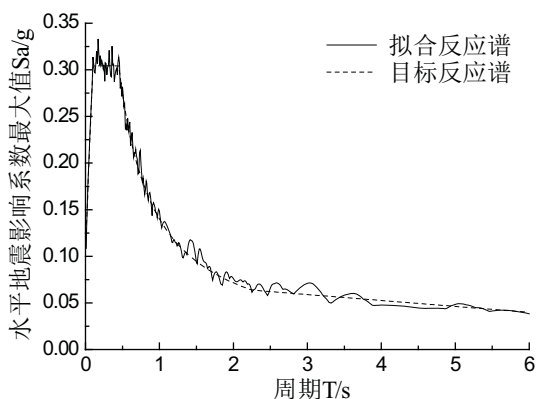


图 6 拟合反应谱与目标反应谱对比

Fig. 6 The Comparison of Fitting Response Spectrum With The Target Response Spectrum

在 Simulink 中采用查表法建立人造地震波时程激励, 通过 SIMAT 接口施加至 SIMPACK 多体动力学模型中的“大地”上。

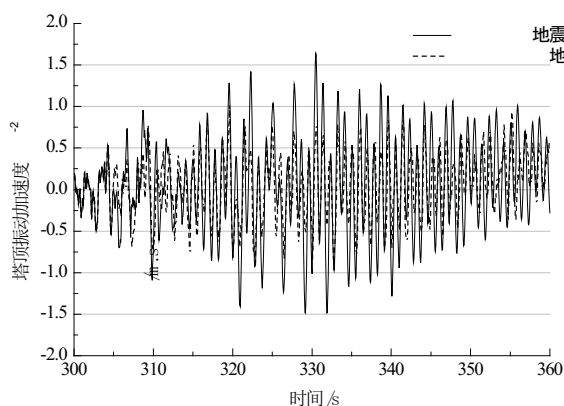


图 7(a). 塔顶振动加速度
Fig. 7(a). Tower Top Acceleration

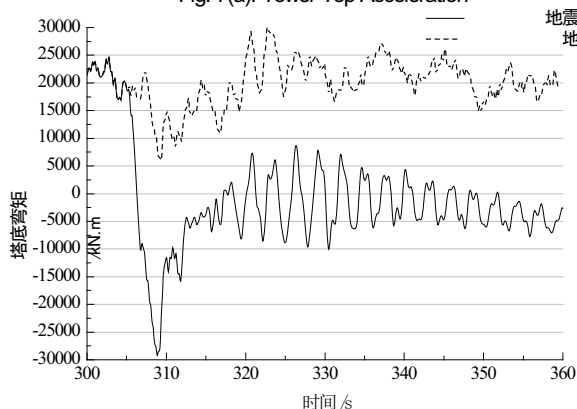


图 7(c). 塔底弯矩
Fig. 7(c). Tower Bottom Moment

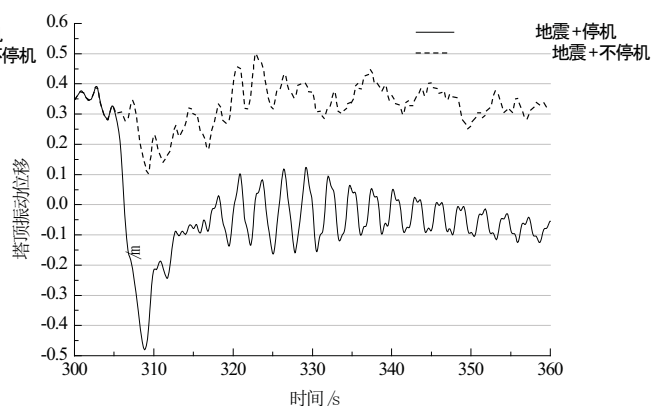


图 7(b). 塔顶振动位移
Fig. 7(b). Tower Top Displacement

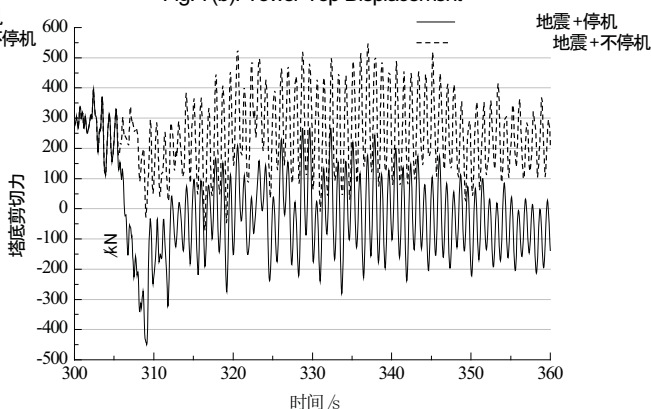


图 7(d). 塔底剪切力
Fig. 7(d). Tower Bottom Shear Force

图 7 仿真结果

Fig. 7 The Simulation Results

由图 7 可知, 触发紧急停机后, 塔顶位移、塔底弯矩和剪切力经历一次剧烈波动后在 0 值附近震荡并逐渐衰减, 与没有停机策略的仿真结果相比, 其地震动力响应曲线走势不同。停机动作对机组在地震作用下的动力响应有显著影响。

2.2 地震载荷对比

2 算例

2.1 时程分析

作为算例, 本文仿真了某 2.0MW 风力发电机组正常发电工况的地震动态响应, 机组参数见表 1。采用 NTM 湍流风, 轮毂高度处平均风速为 12m/s。湍流风文件由 NREL 开发的 TurbSim 程序生成。

机组抗震设防烈度为 8 度, 设计基本地震加速度 0.30g, II 类场地, 设计地震分组为第三组。地震加速度时程激励施加在机组前后方向。仿真时长 360s, 第 300s 开始地震。

计算结果显示, 在 304.6s 塔顶振动加速度超限, 触发安全链停机。

为便于对比分析停机动作对地震动力响应的影响, 在外部控制器中关闭“振动超限触发停机”的策略, 仿真机组在地震作用下的动力响应。

仿真结果如图 7 所示。

地震工况属于极限工况, 在结构极限强度校核时需要考虑。对于塔筒极限强度校核, 塔底弯矩和剪切力极值为关键载荷。

依据国标《GB50011-2010 建筑抗震设计规范》^[8], 建立塔筒梁单元有限元模型, 风轮和机舱处理为集中质量, 取前三阶弯曲模态, 采用振型分解反应谱法,

计算了在

图 4 所示的地震加速度反应谱激励下的塔筒地震载荷,塔底弯矩为 14027.9kN.m,塔底剪力为 273.6kN。通过联合仿真,计算了在 12m/s 湍流风条件下停机过程的极限载荷,塔底弯矩为 25656.2kN.m,塔底剪力为 345.7kN。根据文献[1][2]中的相关规定,两项载荷累加得到地震工况下的塔筒极限载荷,即塔底弯矩为 39684.1kN.m,塔底剪力为 619.3kN。

提取图 7(c)、(d)中“地震+不停机”曲线的极值,得到不考虑停机动作时塔筒的地震载荷,即塔底弯矩为 30897.6kN.m,塔底剪力为 547.6kN。

提取图 7(c)、(d)中“地震+停机”曲线的极值,得到考虑停机动作时塔筒的地震载荷,即塔底弯矩为 29213.2kN.m,塔底剪力为 449.4kN。

三种方法计算的地震载荷对比如表 2 所示。

表 2 地震载荷对比

Table 2 Seismic load comparision

方法	塔底弯矩/kN.m	塔底剪力/kN
振型分解反应谱法	39684.1	619.3
不考虑停机动作的多体动力学仿真	30897.6	547.6
考虑停机动作的多学科联合仿真	29213.2	449.4

由表 2 可知,采用振型分解反应谱法计算的地震载荷最大,是偏保守的。不考虑停机动作,采用多体动力学仿真计算的地震载荷也偏大。

3 结论

本文建立了大型风力发电机组机械、气动、控制联合仿真模型,并以某机型为例,进行了地震动力响应分析。经仿真分析,得出以下结论:

(1) 地震作用下,塔顶振动超限触发机组停机。停机动作将改变机组的动力响应曲线的走势,对地震动力响应有着显著影响。

(2) 采用振型分解反应谱法计算的地震载荷偏保

守。若不考虑停机动作,采用多体动力学方法计算地震载荷,其结果也会偏大。

本文对大型风力发电机组在地震作用下的动力响应分析和载荷计算提供了一种方法,对机组抗震设计有一定的参考价值。

参考文献

[1]. Germanischer Lloyd, Rules and Guidelines, IV - Industrial Services, Part 1 – Guideline for the Certification of Wind Turbines. Edition 2010[S].

[2]. IEC 61400-1 Ed.3, Wind turbines – Part 1: Design requirements[S].

[3]. 贺广零.考虑土—结构相互作用的风力发电高塔系统地震动力响应分析[J].机械工程学报,2009,45(7): 87—94

HE Guangling. Seismic response analysis of wind turbine tower systems considering soil-structure interaction[J]. Journal of mechanical engineering, 2009,45(7): 87—94.

[4]. 贺广零,周 勇,李 杰.风力发电高塔系统地震动力响应分析[J]. 工程力学, 2009, 26(7): 72—77.

He Guangling, Zhou Yong, Li Jie. Seismic analysis of wind turbine system [J] Engineering Mechanics, 2009,26(7): 72—77.

[5]. 吴春艳,金 鑫,何玉林, 等.风力发电机在地震—风力作用下的载荷计算[J].中国机械工程, 2011,22(18): 2236-2240.

Wu Chunyan, Jin Xin, He Yulin, et al. Load calculation of wind turbine subjected to earthquake and wind[J]. China mechanical engineering, 2011,22(18): 2236-2240.

[6]. 金 鑫,王 磊,刘 桦.大功率风力发电机地震动力学建模及载荷计算[J].工程力学,2012,29(5): 224—229.

Jin Xin, Wang Lei, Liu Hua. A large scale wind turbine dynamic model and its load calculation in earthquake[J].Engineering mechanics,2012,29(5): 224—229.

[7]. Laino D J, Hansen A C. AeroDyn user's guide[EB/OL]. <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/aerodyn>

[8]. GB50011-2010, 建筑抗震设计规范[S].

SEISMIC DYNAMIC RESPONSE ANALYSIS OF WIND TURBINE

Peng Chao

(GuoDian United Power Technology Co.,Ltd, Beijing 100039, China)

Abstract: The wind turbine mechanical-aerodynamic-control multi-disciplinary co-simulation model is established. Through numeric simulation, the dynamic response under seismic condition is studied. The calculation results show that the stop action has a significant influence on the seismic dynamic response. By comparison, mode-decomposition response spectrum method and multibody dynamics method without stop action for seismic loads calculation are conservative. A method of valuable reference is developed for the seismic loads calculation of wind turbine.

Keywords: wind turbine; seismic dynamic response; multi-body dynamics; co-simulation