

风力发电机在地震—风力作用下的载荷计算

吴春艳^{1,2} 金鑫¹ 何玉林¹ 王磊¹ 刘桦¹

1. 重庆大学, 重庆, 400044 2. 重庆电子工程职业学院, 重庆, 401331

摘要: 为了对风力发电机在地震—风力作用下的受力情况进行仿真计算, 采用多柔体系统动力学理论建立了风力发电机结构动力学分析模型, 并在 FORTRAN 下编程实现; 采用动态入流理论进行气动载荷计算, 用 Euro code 8 生成地震谱。以某企业开发的大型风力机为对象, 应用该方法, 首先进行了模态分析和地震载荷谱计算, 同权威计算软件 GH Bladed 计算结果比较表明, 建立的计算模型正确可行; 然后, 对该风力机在地震—风力联合作用下的载荷进行了计算, 结果显示, 此时风力机所受载荷比正常情况下高出许多。

关键词: 风力发电机; 多柔体系统动力学理论; 地震; 风载; 载荷计算

中图分类号: TP391 **文章编号:** 1004—132X(2011)18—2236—05

Load Calculation of Wind Turbine Subjected to Earthquake and Wind

Wu Chunyan^{1,2} Jin Xin¹ He Yulin¹ Wang Lei¹ Liu Hua¹

1. Chongqing University, Chongqing, 400044

2. Chongqing College of Electronic Engineering, Chongqing, 401331

Abstract: To calculate the loads on wind turbine subjected to earthquake and wind, a structural dynamic model of offshore wind turbine was established based on flexible multi-body dynamics theory and the model was programmed in FORTRAN; the aerodynamic load was calculated based on the dynamic inflow theory and earthquake spectrum was calculated by the Euro code 8. A wind turbine was chosen as study object, the modal analysis and calculation of earthquake spectrum were done by the method. The calculation results are similar to those calculated by GH Bladed which was an authoritative software of wind power, as a result, the correctness and feasibility of the method were verified. Moreover, the loads on wind turbine subjected to earthquake and wind were calculated by the method and the results show that the loads by earthquake and wind are much higher than those at normal conditions.

Key words: wind turbine; flexible multi-body dynamics theory; earthquake; wind load; load calculation

0 引言

近年来全球地震频发, 由于缺乏足够的预测手段, 地震往往具有很强的不可预见性和突发性。对于风力发电机这样的工业设施, 应对地震灾害, 除了优化选址外, 加强设施本身的抗震能力至关重要。大功率风力机由于其结构特点, 在地震中除了会受到地震力载荷外, 还会受到风力的作用。抗震技术的开发有赖于对风力设施在地震—风力联合作用下的性能分析研究。然而, 目前我国在此方面开展的研究工作很少, 尤其是对整机进行系统的动力响应特性研究的报道寥寥无几。因

此, 结合国内外风力发电结构的理论研究和工程背景, 开展系统的结构动力响应特性研究已成为当前需要解决的重要课题^[1-3]。

目前, 通过了 GL 认证的国际风力发电专用计算软件 GH Bladed 是开展风力机结构动力学研究的重要工具和手段, 但该软件代码都是封闭的, 用户无法将不同的算法和模型应用在系统建模当中, 在一些场合的应用受到限制。本文以某企业开发的大型风力机为研究对象, 采用多柔体系统动力学理论建立风力发电机结构动力学分析模型, 在 FORTRAN 下进行风力发电机系统结构动力学分析编程实现, 采用动态入流理论进行气动载荷计算, 用 Euro code 8 生成地震谱, 计算风力机在地震—风力联合作用下的受力情况。作为参考和验证, 将分析数据同权威计算软件 GH

收稿日期: 2010—10—18

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51005255); 高等学校博士学科点科研基金资助项目(20090191120005); 重庆市自然科学基金资助项目(CSTC2008BB6316)

Bladed 的计算结果进行了比较。

1 多柔体系统动力学模型

Kane 方法是建立多自由系统动力学方程的一种方法,其基本思想源于阿贝尔提出的伪坐标概念,即利用广义速率代替广义坐标作为独立变量描述系统的运动,Kane 方法可以避免动力学函数求导的复杂步骤,而直接利用达朗贝尔原理建立系统动力学方程,兼有矢量力学和分析力学的特点,既适用于完整系统,也适用于非完整系统。对于自由度较多的复杂系统,Kane 方法可以减少计算步骤^[4-6]。

对于风力发电机组系统,当确定了每个刚体的偏速度和偏角速度,以及相应的广义主动力 F_r 和广义惯性力 F_r^* 之后,其 Kane 动力学方程可表示为

$$F_r + F_r^* = 0 \quad r = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

即每个广义速率对应的广义主动力和广义惯性力之和等于零。设风力发电机组系统由 w 个刚体组成。假设对于刚体 N_i ,主动力施加在其质心 X_i ,则风力发电机组系统的广义主动力和其对应的广义惯性力分别为

$$F_r = \sum_{i=1}^w v_r^{(X_i)} F^{(X_i)} + E \omega_r^{(N_i)} M^{(N_i)} \quad r = 1, 2, \dots, 15 \quad (2)$$

$$F_r^* = \sum_{i=1}^w v_r^{(X_i)} (-m^{(N_i)} (E a^{(X_i)})) + E \omega_r^{(N_i)} (-E \dot{H}^{(N_i)}) \quad (3)$$

式中, $E \omega_r^{(N_i)}$ 和 $v_r^{(X_i)}$ 分别为第 N_i 个刚体在惯性坐标系 E 中的第 r 偏角速度矢量和第 r 偏线速度质心处矢量; $M^{(N_i)}$ 和 $F^{(X_i)}$ 分别为第 N_i 个刚体在惯性坐标系 E 中的主动力矩和主动力; $m^{(N_i)}$ 为第 N_i 个刚体质量; $E a^{(X_i)}$ 为第 N_i 个刚体在惯性坐标系 E 中的第 r 偏角加速度矢量。

风力发电机组系统各个刚体所受的广义惯性力之和等于风力发电机组系统的广义惯性力,即

$$F_r^* = F_r^* |_X + F_r^* |_T + F_r^* |_N + F_r^* |_H + F_r^* |_{B1} + F_r^* |_{B2} + F_r^* |_{B3} + F_r^* |_G \quad (4)$$

式中, $F_r^* |_X$ 为基座的广义惯性力; $F_r^* |_T$ 为塔架的广义惯性力; $F_r^* |_N$ 为机舱的广义惯性力; $F_r^* |_H$ 为轮毂的广义惯性力; $F_r^* |_{B1}$ 为叶片 1 的广义惯性力; $F_r^* |_{B2}$ 为叶片 2 的广义惯性力; $F_r^* |_{B3}$ 为叶片 3 的广义惯性力; $F_r^* |_G$ 为发电机的广义惯性力。

广义主动力由所有作用于风力机系统的力、不同刚体之间相互的作用力以及柔性部件的内力所产生。包括叶片和塔架上的气动力;作用在基座、塔架、偏航轴承、机舱、轮毂、叶片、叶尖刹车、尾翼的重力;发电机扭矩;高速轴刹车力以及齿轮

箱摩擦力;偏航运动时,部件所受的约束力;柔性部件,如叶片、塔架和传动链的弹性和阻尼内力。

因此风力发电机组系统的广义主动力为

$$F_r = F_r |_{Aero,T} + F_r |_{Aero,B1} + F_r |_{Aero,B2} + F_r |_{Aero,B3} + F_r |_{Grav,X} + F_r |_{Grav,T} + F_r |_{Grav,N} + F_r |_{Grav,H} + F_r |_{Grav,B1} + F_r |_{Grav,B2} + F_r |_{Grav,B3} + F_r |_{Spring,Yaw} + F_r |_{Damp,Yaw} + F_r |_{Gen} + F_r |_{Brake} + F_r |_{GBFrict} + F_r |_{Elastic} + F_r |_{Damp,T} + F_r |_{Elastic,B1} + F_r |_{Damp,B1} + F_r |_{Elastic,B2} + F_r |_{Damp,B2} + F_r |_{Elastic,B3} + F_r |_{Damp,B3} + F_r |_{Elastic,Drive} + F_r |_{Damp,Drive} \quad (5)$$

其中,广义主动力依次为:塔架所受气动力产生的广义主动力、叶片 1 所受气动力产生的广义主动力、叶片 2 所受气动力产生的广义主动力、叶片 3 所受气动力产生的广义主动力、基座所受重力产生的广义主动力、塔架所受重力产生的广义主动力、机舱所受重力产生的广义主动力、轮毂所受重力产生的广义主动力、叶片 1 所受重力产生的广义主动力、叶片 2 所受重力产生的广义主动力、叶片 3 所受重力产生的广义主动力、偏航弹簧力产生的广义主动力、偏航阻尼力产生的广义主动力、发电机扭矩产生的广义主动力、高速轴刹车产生的广义主动力、齿轮箱摩擦力产生的广义主动力、柔性塔架的弹性力产生的广义主动力、柔性塔架的阻尼力产生的广义主动力、柔性叶片 1 的弹性力产生的广义主动力、柔性叶片 1 的阻尼力产生的广义主动力、柔性叶片 2 的弹性力产生的广义主动力、柔性叶片 2 的阻尼力产生的广义主动力、柔性叶片 3 的弹性力产生的广义主动力、柔性叶片 3 的阻尼力产生的广义主动力、柔性传动链的弹性力产生的广义主动力、柔性传动链的阻尼力产生的广义主动力。

将式(4)和式(5)代入 Kane 动力学方程(式(1))中,可以得到风力发电机组系统动力学方程,其矩阵形式为

$$C(q,t)\ddot{q} + f(\dot{q},q,t) = 0 \quad (6)$$

式中, $C(q,t)$ 为系统加速度的系数矩阵; $f(\dot{q},q,t)$ 为与系统位移和速度相关的向量。

求解时,在每个时间步,方程的数值解的第一步是采用 4 阶 Adams—Beshforth 预测—修正算法的预测方法确定低阶项的值,并以此构成方程的右边项,然后采用 Gauss 消元法求解系统自由度的加速度,这些计算得到的加速度值用于修正预测值,以提高预测精度。经过几次迭代后,采用 4 阶 Adams—Mouton 预测—修正算法的修正方法确定加速度的值,并给出该时间步的最终解。由于该预测—修正算法不是自发的,前 4 个时间步的解需要用 4 阶 Runge—Kutta 法确定。

2 风载荷

风力机气动性能计算方法采用 GDW 理论, 它基于无黏性、不可压缩气体流动的 La place 方程的势能流解, 相较于叶素动量理论(BEM)可以描述风轮盘上的更一般的压力分布^[7-8]。GDW 理论中, 关于诱导速度沿半径方向和方位角方向分布的规律可以表示为

$$\begin{aligned}
 w(\hat{r}, \psi, \dot{t}) = & \varphi_1^0(\hat{r})\alpha_1^0(\dot{t}) + \varphi_3^0(\hat{r})\alpha_3^0(\dot{t}) + \\
 & \varphi_5^0(\hat{r})\alpha_5^0(\dot{t}) + \varphi_7^0(\hat{r})\alpha_7^0(\dot{t}) + \\
 & \varphi_2^1(\hat{r})[\alpha_2^1(\dot{t})\cos(\psi) + \beta_2^1(\dot{t})\sin(\psi)] + \\
 & \varphi_4^1(\hat{r})[\alpha_4^1(\dot{t})\cos(\psi) + \beta_4^1(\dot{t})\sin(\psi)] + \\
 & \varphi_6^1(\hat{r})[\alpha_6^1(\dot{t})\cos(\psi) + \beta_6^1(\dot{t})\sin(\psi)] + \\
 & \varphi_8^1(\hat{r})[\alpha_8^1(\dot{t})\cos(2\psi) + \beta_8^1(\dot{t})\sin(2\psi)] + \\
 & \varphi_{10}^1(\hat{r})[\alpha_{10}^1(\dot{t})\cos(2\psi) + \beta_{10}^1(\dot{t})\sin(2\psi)] + \\
 & \varphi_{12}^1(\hat{r})[\alpha_{12}^1(\dot{t})\cos(2\psi) + \beta_{12}^1(\dot{t})\sin(2\psi)] + \\
 & \varphi_{14}^1(\hat{r})[\alpha_{14}^1(\dot{t})\cos(3\psi) + \beta_{14}^1(\dot{t})\sin(3\psi)] + \\
 & \varphi_{16}^1(\hat{r})[\alpha_{16}^1(\dot{t})\cos(3\psi) + \beta_{16}^1(\dot{t})\sin(3\psi)]
 \end{aligned} \quad (7)$$

式(5)中的径向形函数 $\varphi_j^r(\hat{r})$ 为

$$\begin{aligned}
 \varphi_j^r(\hat{r}) = & \sqrt{(2j+1)H_j^r} \cdot \\
 & \sum_{q=r, r+2}^{j-1} i^q \frac{(-1)^{\frac{q-r}{2}}(j+q)!!}{(q-r)!!(q+r)!!(j-q-1)!!} \quad (8) \\
 H_j^r = & \frac{(j+r-1)!!(j-r-1)!!}{(j+r)!!(j-r)!!} \quad (9)
 \end{aligned}$$

为了确定诱导速度的分布, 在式(9)中还需要知道系数 α_j^r 和 β_j^r 。因为连续的无黏性不可压缩流体的压强梯度分布满足 La place 方程, 所以 GDW 理论的主控制方程为

$$\mathbf{M} \begin{Bmatrix} \vdots \\ \alpha_j^r \\ \vdots \end{Bmatrix} + \mathbf{V}[\mathbf{L}^r]^{-1} \begin{Bmatrix} \vdots \\ \alpha_j^r \\ \vdots \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \vdots \\ \tau_n^{mc} \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{M} \begin{Bmatrix} \vdots \\ \beta_j^r \\ \vdots \end{Bmatrix} + \mathbf{V}[\mathbf{L}^s]^{-1} \begin{Bmatrix} \vdots \\ \beta_j^r \\ \vdots \end{Bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{Bmatrix} \vdots \\ \tau_n^{ms} \\ \vdots \end{Bmatrix} \quad (11)$$

式中, \mathbf{M} 为显式质量矩阵; $\mathbf{V}[\mathbf{L}^s]^{-1}$ 为入流系数矩阵; τ 为叶片的压力系数。

解该微分方程组, 可以得到入流系数 α_j^r 、 β_j^r 和风轮上的诱导速度分布, 从而计算出轴向、切向诱导速度因子 a 、 a' 。

3 地震载荷

地震载荷以加速度历程的形式作用于风力发电机组上, 而加速度则依据结构规范中设计加速度的反应谱生成^[9-11]。在工程设计中, 欧洲规范(Euro code8)在世界上得到了广泛的使用。为具

有普适性, 在本文中, 地震荷载以加速度时程的形式作用于风力发电高塔系统基底, 而加速度则依据结构规范中设计加速度反应谱生成。因风力发电高塔系统属高耸结构, 竖向地震荷载不可忽略, 故本文生成了水平和竖直 2 个方向的加速度时程并作用于结构上。不失一般性, 现以生成水平向加速度时程为例进行说明。依据 Euro code8, 地震荷载水平向加速度反应谱可表示为

$$\left. \begin{aligned}
 S_d(T) = & a_g S \left[\frac{2}{3} + \frac{T}{T_B} \left(\frac{2.5}{q} - \frac{2}{3} \right) \right] \quad 0 \leq T \leq T_B \\
 S_d(T) = & a_g S \frac{2.5}{q} \quad T_D \leq T \leq T_B \\
 S_d(T) = & \begin{cases} = a_g S \frac{2.5}{q} \left(\frac{T_C}{T} \right) & T_C \leq T \leq T_D \\ \geq \beta a_g & \end{cases} \\
 S_d(T) = & \begin{cases} = a_g S \frac{2.5}{q} \left(\frac{T_C T_D}{T^2} \right) & T_D \leq T \\ \geq \beta a_g & \end{cases} \\
 \eta = & [10/(5 + \xi)]^{1/2}
 \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

式中, T 为线性单自由度系统自振周期, 取 $T = 1\text{s}$; T_B 、 T_C 为加速度谱常数段界限, 取 $T_B = 0.15\text{s}$, $T_C = 0.4\text{s}$; T_D 为定义谱中常数位移反应范围的值, 取 $T_D = 2\text{s}$; a_g 为 A 类场地的地面设计加速度峰值, 取 $a_g = 0.35g$; S 为土系数, 与场地类别有关, 取 $S = 1$; q 为性能系数, 与横截面类型有关, 取 $q = 1$; β 为动力系数, 规范建议取 $\beta = 0.2$; η 为阻尼修正系数, 式中取 $\xi = 0.05$ 。

4 功率控制策略

大功率风力发电机组控制策略保证低风速时最大吸收风能, 高于额定风速时, 使功率稳定在额定值。当风速低于额定风速时, 采用电机变速控制, 以最大吸收风能, 保证功率系数最大。其表达式为

$$\left. \begin{aligned}
 P_{\text{opt}} = & k_{\text{opt}} \omega_r^2 \\
 k_{\text{opt}} = & \frac{0.5\pi R^3 C_{p, \text{max}}}{\lambda_{\text{opt}}^3}
 \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

式中, $C_{p, \text{max}}$ 为最大功率系数。

当风速高于额定风速时, 对风力发电机进行变桨距控制, 变桨距角随风速的变化计算公式为

$$\left. \begin{aligned}
 C_p(\lambda, \beta) = & P_{\text{rated}} / (0.5\rho\pi R^2 v^3) \\
 \beta = & f(C_p, \lambda)
 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

式中, P_{rated} 为额定功率。

5 风力机系统分析模型编程实现

根据风机的系统特性, 按照式(1)~式(14)在 Fortran 下进行风力发电机系统建模。风力发电机电动力学建模简图见图 1。

同时生成文件. adm 和. acf, 并建立 adams_

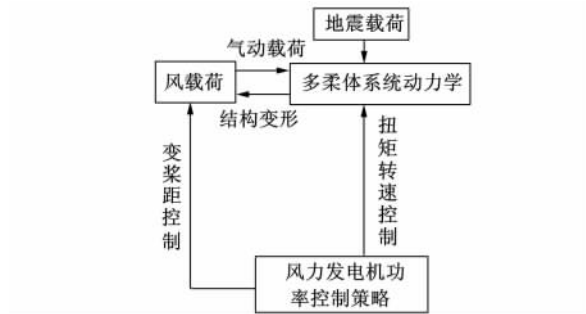


图1 风力发电机动力学建模简图

plant.dll 动态链接文件。建立的 Fortran 风力机仿真模型主要部件包括风轮、塔架、齿轮箱、电机等部件模型,如图 2 所示。其中风轮和塔架均为柔性体,齿轮箱和电机只需要考虑传动比和电机反应扭矩以及质量分布即可,不必建立详细模型。

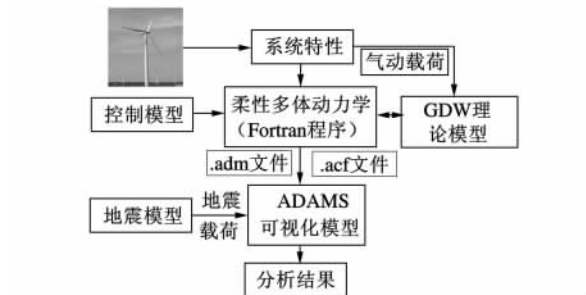


图2 风力发电机组仿真流程

6 计算分析结果

对某 2MW 变速变桨风力发电机组进行动力学仿真分析。该 2MW 变速变桨风力机基本结构是三叶片上风向风力机,功率调节方式为变速变桨调节,主要参数如表 1 所示。

表 1 2MW 风力发电机组主要参数

额定功率(MW)	2
叶片长度(m)	38.75
风轮直径(m)	80
塔架高度(m)	60
齿轮箱传动比	117
额定转速(r/min)	15
最小变桨角(°)	0
最大变桨角(°)	30
发电机额定转速(r/min)	1755
发电机额定转矩(N·m)	12385.6

6.1 模态分析

先进行模态分析,分析结果与 GH Bladed 计算结果的比较如表 2、图 3 和图 4 所示。结果显示,除塔架的 2 阶纵向模态相差比例在 -18.62%,相对较大外,其他数据的相差比例均在 8%以内,差异不大,表明该结构动力学分析模型是正确的。

表 2 2MW 风力发电机组叶片及塔架固有频率

叶尖模态	1 阶拍动	2 阶拍动	1 阶挥舞	2 阶挥舞
本文结果(Hz)	0.7439	2.1706	1.3337	34.27
Bladed 结果(Hz)	0.74	2.08	1.32	37.05
相差比例(%)*	0.53	4.36	1.04	-7.50
塔架模态	1 阶纵向	2 阶纵向	1 阶侧向	2 阶侧向
本文结果(Hz)	0.333	1.18	0.333	2.47
Bladed 结果(Hz)	0.34	1.45	0.34	2.63
相差比例(%)*	-2.06	-18.62	-2.06	-6.08

注*: 相差比例=(本文计算结果-Bladed 结果)/ Bladed 结果

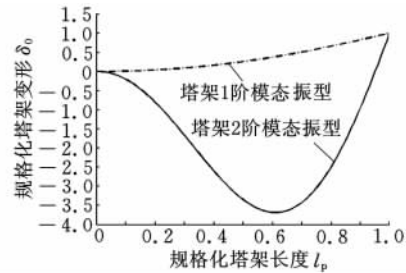


图3 塔架振动模态

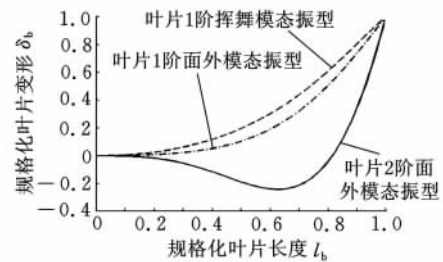
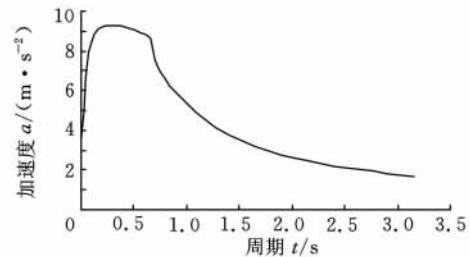


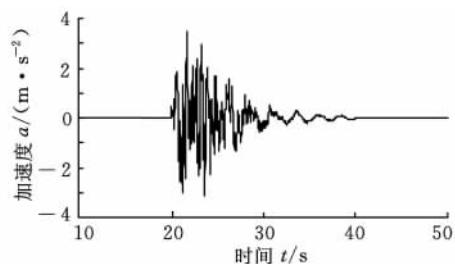
图4 叶片振动模态

6.2 地震载荷谱

地震载荷谱的仿真结果如图 5 所示,其与 GH Bladed 计算结果的比较如表 3 所示,结果显示,本文的计算数据均比 GH Bladed 的计算数据偏小;此外,两者结果除塔架的变形量和变形速度



(a)目标地震谱



(b)地震的加速度载荷谱

图5 振动分析结果

相差较大外(约 18%),其他数据的差异均在合理范围,进一步验证了本文建立分析模型的正确性。

表 3 风力机振动分析结果比较

叶尖	变形量 (m)	变形速度 (m/s)	变形加速度 (m/s ²)
本文结果	3.81	10.52	34.27
Bladed 结果	4.17	11.92	37.05
相差比例(%)	-8.63	-11.74	-7.50
塔架	变形量 (m)	变形速度 (m/s)	变形加速度 (m/s ²)
本文结果	0.56	1.18	2.47
Bladed 结果	0.69	1.45	2.63
相差比例(%)	-18.84	-18.62	-6.08

6.3 载荷分析

在验证完模型的正确性后,对模型风力发电机组的塔基载荷、叶根载荷和主轴载荷最大值进行了计算,结果如表 4~表 6 所示。

表 4 塔基载荷最大值比较

力	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kN·m)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)
地震	4088.0	705.3	769.5	4381.9	54134	44883
不考虑地震	3010.8	236.0	818.3	1339.1	49254	12434
相差比例(%)**	35.78	198.86	-5.96	227.23	9.91	260.97

注** : 相差比例 = (地震 - 不考虑地震) / 不考虑地震

表 5 叶根载荷最大值比较

力	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kN·m)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)
地震	492.1	245.0	333.6	168.7	7395.0	4732.0
不考虑地震	127.1	123.5	134.3	54.0	3151.1	1738.6
相差比例(%)**	287.18	98.38	148.40	212.41	134.68	172.17

表 6 主轴载荷最大值比较

力	F_x (kN)	F_y (kN)	F_z (kN)	M_x (kN·m)	M_y (kN·m)	M_z (kN·m)
地震	619.2	750.1	712.9	3086.7	6696.6	6582
不考虑地震	367.3	470.6	464.3	1522.1	1304.9	1511
相差比例(%)**	68.58	59.39	53.54	102.79	413.19	335.61

从上述数据及比较来看,地震对风力机载荷最大值的影响是很大的,最大影响出现在主轴载荷最大值上(增加了 413.19%)。计算结果对风力机的抗震结构设计具有很好的参考意义。

7 结论

(1) 通过将本文计算结果与 GL 认证软件

• 2240 •

Bladed 的计算结果进行对比表明,本文所建立并使用的计算模型不仅正确可行,而且可以根据用户使用的算法和模型的需要修改子模型。

(2) 将本文建立的模型应用于某大功率风力机地震-风力联合作用下的载荷仿真计算,比较准确、实时地模拟了其在各种工况下的受载情况。结果表明,地震时风力发电机载荷比正常情况下所受载荷要高出许多。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 李长凤. 风力发电结构动力反应的一体化有限元模型分析[J]. 特种结构, 2008, 25(2): 17-19.
- [4] 洪嘉振. 计算多体系统动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [5] 齐朝晖. 多体系统动力学[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [6] Homer R, Steve R. Multi-body Dynamics Monitoring and Simulation Techniques III[M]. London: Professional Engineering Pub., 2004.
- [7] 金鑫, 何玉林, 杜静, 等. 风力机结构耦合振动分析[J]. 中国机械工程, 2008, 19(1): 9-13.
- [8] 刘桦, 何玉林, 金鑫, 等. 基于 GDW 理论的失速型风力机整机性能分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(3): 343-348.
- [9] Bazeos N, Halzigeorgious G D, Hondros I D. Static, Seismic and Stability Analyses of a Prototype Wind Turbine Steel Tower[J]. Engineering Structures, 2002, 24(8): 1015-1025.
- [10] European Committee for Standardization. BS EN 1998-5-2004 Eurocode8: Design of Structures for Earthquake Resistance[S]. London: London South Bank University, 2003.
- [11] 沈聚敏. 抗震工程学[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2004.

(编辑 何成根)

作者简介: 吴春艳, 女, 1975 年生. 重庆大学机械工程学院访问学者, 重庆电子工程职业学院机电工程系讲师. 研究方向为机械 CAD/CAE. 金鑫, 男, 1979 年生. 重庆大学机械工程学院副教授、博士. 何玉林, 男, 1945 年生. 重庆大学机械工程学院教授、博士研究生导师. 王磊, 男, 1982 年生. 重庆大学机械工程学院博士研究生. 刘桦, 男, 1975 年生. 重庆大学机械工程学院博士研究生.