

风电机组塔架极限风载荷计算及对比研究

高春彦^{1,2}, 刘 泽², 史治宇¹

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京 210016; 2. 内蒙古科技大学土木工程学院, 包头 014010)

摘 要: 以某2 MW水平轴风力发电机组为计算模型,分别采用GH Bladed软件和日本《风力发电设备塔架结构设计指南及解说》对该风电机组塔架的极限风载荷进行计算,并研究在正常发电工况和暴风工况下2种计算方法的差异。结果表明,由2种计算方法得到的正常发电工况下的极限风载荷均大于暴风工况,由GH Bladed软件得到的极限风载荷计算结果偏大。造成极限风载荷差异的主要原因是2种计算方法的风况条件、工况种类及理论基础不同造成的。对于风力发电机塔架这种典型的“高鸡腿哑铃式”高耸结构因其塔顶部位受风轮、机舱的影响较大,采用GH Bladed软件计算结果更精确。

关键词: 风电机组; 塔架; 极限载荷; 标准

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

近年来,随着可持续发展的理念深入人心,开发风能作为解决人类面临的能源匮乏和环境污染两大问题的有效措施之一,全球风电产业进入快速发展的扩张阶段^[1,2]。

现代大型风电机组结构尺寸庞大,载荷、边界条件复杂,中国目前尚无能力自主研发风电机组,核心制造技术的缺失是中国风电机组设计的瓶颈,相关风电机组设计的理论、试验研究和新技术应用等方面都落后于国外发达国家。自主研发风电机组关键的一环便是塔架的载荷设计,只有将作用于塔架的载荷类型、计算方法搞清楚,才能够准确计算风电机组塔架的极限强度和疲劳强度,降低风电机组在设计使用年限内意外事件的发生^[3,4]。

目前在国内外风电市场上的风电机组绝大多数采用锥筒型塔架。而在中国不仅对兆瓦级风电机组塔架所受载荷来源、种类、计算方法等尚无明确规范,而且对风电机组塔架设计合理性的判断标准也处于探索阶段^[5-7]。

本文以某2 MW水平轴风电机组为研究对象,引入适当的载荷坐标系,对由国际风电机组设计软件GH Bladed得到的风荷载计算结果和日本土木学会《风力发电设备塔架结构设计指南及解说》得到的计算结果进行比较^[8]。GH Bladed是由英国 Garrad Hassan 公司推出,以IEC 61400-1为理论依据的设计软件,其适用于多种尺寸和形式的水平轴风力发电机的设计,集结构动力学、流体力学、空气动力学和控制系统响应于一体,在进行风力发电机组设计时考虑正常发电、紧急停机、故障以及各种非常规风的设计载荷情况。与之不同,《风力发电设备塔架结构设计指南及解说》中认为风力发电机塔架在正常发电时的荷载比其他荷载大得多,因此主要对作用于风力发电机组的发电时最大风荷载、暴风时最大风荷载进行计算。

1 风电机组及风场相关参数

本文选用2 MW变桨距式风电机组,主要参数见表1。该机组翼型选用LS1m21r2。风场采用包头市白云鄂博某风场,相关参数见表2^[9]。

收稿日期: 2016-12-09

基金项目: 国家自然科学基金(11172131); 内蒙古自然科学基金(2018MS05041)

通信作者: 高春彦(1978—),女,博士、副教授,主要从事钢与混凝土组合结构和结构抗震方面的研究。gao-197844@163.com

表 1 2 MW 风电机组相关参数

Table 1 2 MW wind turbine related parameters

参数	数值	参数	数值
机组容量/MW	2	功率调节	变桨变速
叶片数/个	3	切入风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	4
风轮直径/m	80	切出风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	25
轮毂中心高度/m	61.5	额定风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	12

表 2 包头白云鄂博某风场相关参数

Table 2 Parameters of a wind field in Baiyunebo, Baotou

参数	数值
年平均风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	5
包头白云鄂博最大风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	26
湍流强度 I_{ref}	0.16

2 塔架的载荷计算

鉴于本文主要研究风电机组塔架,仅给出塔架坐标系如图 1 所示。图 1、图 2 中 M_{xt} 、 M_{yt} 、 M_{zt} 分别为塔架坐标系中 x 、 y 、 z 方向的力矩分量, kNm ; F_{xt} 、 F_{yt} 、 F_{zt} 分别为塔架坐标系中 x 、 y 、 z 方向的力分量, kN ; x_t 、 y_t 、 z_t 代表塔架坐标系的各个方向; H_t 为塔架高度, m 。

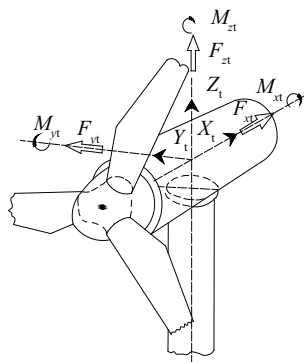


图 1 塔架坐标

Fig. 1 Tower coordinate system

为便于比较,把塔架平均分成 20 小段,每段高度为 3 m。塔架计算简图如图 2 所示。

2.1 由《风力发电设备塔架结构设计指南及解说》计算的最大风荷载

在《风力发电设备塔架结构设计指南及解说》(以后均称《指南》)中,发电时最大风荷载主要通过各风速下发电时的平均风荷载乘以各风速对应的

阵风荷载因子、风荷载统计外插系数和安全分项系数来计算。评估公式是在 IEC 61400-1 第三版中追加了正常发电时最大风荷载 50 年重现期的期待值这一新的荷载情况后提出的。

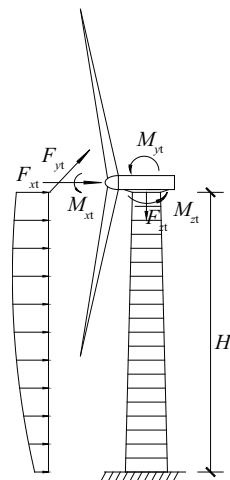


图 2 塔架计算简图

Fig. 2 Tower calculation diagram

暴风工况时,因该实例机组为可偏航控制风电机组,此时机组状态为停机、顺桨、偏航 90° 。该风况下塔架上作用的风荷载是在假设风轮固定、机舱为刚性的基础上,由风轮、机舱和塔架作用的平均风荷载乘以阵风荷载因子来计算。该因子除了考虑风力机尺寸和振动特性外,还考虑引入升力梯度后气动阻尼的影响。

在计算塔架风荷载之前,首先需计算出叶片、机舱以及塔架的平均风力系数,该系数是假设风力机单独存在时基于风洞试验结果确定的。

2.1.1 发电时的风荷载计算

发电时的最大风荷载为峰值剪力的 50 年再现期待值 Q_{D50} 以及峰值弯矩 50 年再现期待值 M_{D50} , 其值分别由峰值剪力 Q_{Dmax} 和峰值弯矩 M_{Dmax} 乘以统计外插系数 γ_e 和安全分项系数 γ_f 求得,计算公式如式(1)、式(2)所示:

$$Q_{D50} = Q_{Dmax} \times \gamma_e \times \gamma_f \quad (1)$$

$$M_{D50} = M_{Dmax} \times \gamma_e \times \gamma_f \quad (2)$$

峰值剪力 Q_{Dmax} 、峰值弯矩 M_{Dmax} 可由发电时各风速对应的平均剪力 Q_{Di} 、平均弯矩 M_{Di} 乘以该风速下的阵风荷载因子 G_{Di} 求得,如式(3)、式(4)所示:

$$Q_{Dmax} = \max(Q_{Di} \times G_{Di}) \quad (3)$$

$$M_{Dmax} = \max(M_{Di} \times G_{Di}) \quad (4)$$

各风速对应的平均剪力 Q_{Di} 、平均弯矩 M_{Di} 为作用于风轮、机舱与塔架的剪力、弯矩之和。计算时风速从 4~25 m/s 每隔 2 m/s 变化一次,共以 11 个风速进行计算,如式(5)、式(6)所示:

$$Q_{Di} = \frac{1}{2} \rho U_{Hi}^2 C_{Ti} \pi R^2 + \frac{1}{2} \rho U_{Hi}^2 C_{DN} A_N + \int_h^{H_i} \frac{1}{2} \rho U_i(z)^2 C_{DT} d(z) \quad (5)$$

$$M_{Di} = \left(\frac{1}{2} \rho U_{Hi}^2 C_{Ti} \pi R^2 + \frac{1}{2} \rho U_{Hi}^2 C_{DN} A_N \right) \times (H_h - h) + \int_h^{H_i} \frac{1}{2} \rho U_i(z)^2 C_{DT} d(z) (z - h) dz \quad (6)$$

式中, ρ ——空气密度, kg/m³; i ——风速级别, m/s; U_{Hi} ——风速级别为 i 时轮毂高度处的风速, m/s; C_{Ti} ——发电时对应于风速 U_{Hi} 的风轮推力系数; C_{DN} 、 C_{DT} ——机舱、塔架的平均阻力系数; $U_i(z)$ ——风速级别为 i 时 z 高度处的风速, m/s; $d(z)$ ——高度 z 处塔架的直径, m; H_i ——塔架高度, m; h ——评估高度, m。

2.1.2 暴风时的风荷载计算

对于变桨距风电机组,在暴风时叶轮被制动,即由刹车阀固定停止转动,机舱偏航 90°与风向垂直,叶轮旋转至一支与风向平行,其余两支方位角分别为 30°和 150°。

暴风时作用在风轮的风荷载和作用在机舱上的风荷载如式(7)、式(8)所示。

$$F_r(\phi) = q_m C_{br} c \Delta r (\cos \alpha)^3 \quad (7)$$

$$F_m(\phi) = q_m C_m(\phi) \times A_n \quad (8)$$

式中, C_{br} 、 C_m ——叶轮、机舱的风力系数; c ——叶片弦长, m; A_n ——机舱的代表面积; q_m ——作用于风轮和机舱的速度压, N/m²; ϕ ——偏航角, rad; α ——叶片与水平向的夹角, rad。

q_m 可通过式(9)计算:

$$q_m = \frac{1}{2} \rho U_h^2 (1 + I_{h1}^2) G_i(\phi, \psi) \quad (9)$$

式中, U_h ——轮毂高度处的平均风速, m/s; G_i ——阵风载荷因子; I_{h1} ——设计风速时轮毂高度处顺风向的湍流强度; ψ ——方位角, rad。

塔架评估高度 h 处的剪力 $Q_i(h, \phi, \psi)$ 和弯矩 $M_i(h, \phi, \psi)$ 由式(10)、式(11)计算:

$$Q_i(h, \phi, \psi) = F_r(\phi, \psi) + F_m(\phi) + \int_h^{H_i} q_u(z) dz \quad (10)$$

$$M_i(h, \phi, \psi) = [F_r(\phi, \psi) + F_m(\phi)] \times (H_h - h) + \int_h^{H_i} q_u(z) (z - h) dz \quad (11)$$

式中, ψ ——方位角; H_h 、 H_i ——轮毂高度和塔架高度; q_u ——作用于塔架的速度压, N/m²。

q_u 可通过式(12)计算:

$$q_u(z) = \frac{1}{2} C_{ui} \rho U^2(z) (1 + I_1^2(z)) G_i(\phi, \psi) d(z) \quad (12)$$

式中, C_{ui} ——塔架风力系数; U_z ——高度 z 处的风速, m/s; I_{h1} ——高度 z 处顺风向的湍流强度; $d(z)$ ——高度 z 处塔架直径, m。

当暴风时,作用于塔架的最大扭矩 M_T 可通过式(13)计算:

$$M_T = -\text{sig}(y_r) F_r L_r - \text{sig}(y_n) F_n L_n \quad (13)$$

式中, y_r ——作用于风轮的风荷载中心的 y 坐标; y_n ——作用于机舱的风荷载中心的 y 坐标; $\text{sig}(y_i)$ —— y 坐标为正时等于 +1, 为负时等于 -1; L_r 、 L_n ——作用于风轮中心、机舱中心的力到塔架中心轴的距离。

由《指南》得到的正常发电工况及暴风工况下沿塔架高度方向各截面的内力计算结果见表 3。由表 3 可知,根据《指南》中的计算方法,可得到正常发电工况以及暴风工况下塔架各截面的剪力、倾覆力矩以及扭矩。由表 3 还可发现,塔架在正常发电工况下的剪力和倾覆力矩均大于暴风工况。

2.2 由 GH Bladed 计算的最大风荷载

GH Bladed 软件中的空气动力载荷计算是基于动量-叶素理论。在载荷计算之前首先要对风场和机组建立模型。基于风场基本理论,风场设置在范围上要保证“足够大”,即风场应在宽度、高度方向上覆盖整个机组。根据机组信息,风场宽度选为 150.0 m,垂直高度选为 150.0 m,纵向应充分考虑尾流影响,故根据以往经验,纵向长度选为 1084.8 m。

考虑到机组额定风速为 12 m/s,故风场设计仿真时间内平均风速为 12 m/s,年平均风速设为 5 m/s,平均风速参考高度为叶轮轮毂高度 61.5 m。

表3 《指南》计算结果
Table 3 Calculation results of guideline

风电机组 各部分 编号	塔架各 部分底部 高度/m	塔架各 部分中央 外径/m	正常发电工况				暴风工况		
			Q_{Dmax}/kN	Q_{D50}/kN	M_{Dmax}/kNm	M_{D50}/kNm	Q_i/kN	M_j/kNm	M_k/kNm
机舱	60	—	413.8	700.2	632.7	1029.7	371.8	561.7	1141.4
(1)	57	2.619	415.6	702.8	1900.3	3092.8	377.1	1685.0	1141.4
(2)	54	2.658	417.8	706.2	3173.4	5164.7	382.3	2824.1	1141.4
(3)	51	2.697	420.7	710.5	4453.4	7248	388.1	3979.8	1141.4
(4)	48	2.734	424	715.3	5741.7	9344.7	394.4	5153.6	1141.4
(5)	45	2.766	427.5	720.6	7039.2	11456.3	401.2	6347.0	1141.4
(6)	42	2.797	431.3	726.6	8346.5	13583.9	408.2	7561.1	1141.4
(7)	39	2.828	435.4	732.3	9664.4	15728.8	415.5	8796.7	1141.4
(8)	36	2.859	439.7	738.6	10993.5	17891.9	423	10054.4	1141.4
(9)	33	2.895	444.1	745.3	12334.4	20074.2	430.6	11334.8	1141.4
(10)	30	2.938	448.9	752.6	13687.6	22276.6	438.4	12638.2	1141.4
(11)	27	2.984	453.8	759.7	15053.9	24500.2	446.2	13965.1	1141.4
(12)	24	3.031	458.9	767.4	16433.7	26745.8	454.2	15315.7	1141.4
(13)	21	3.077	464.3	775.3	17838.5	29032.2	462.2	16690.2	1141.4
(14)	18	3.123	469.9	783.6	19247.1	31324.7	470.4	18089.1	1141.4
(15)	15	3.169	475.6	792.2	20671.0	33642.1	478.6	19512.5	1141.4
(16)	12	3.211	481.6	801.1	22110.7	35985.1	486.9	20960.7	1141.4
(17)	9	3.238	487.7	810.2	23566.6	38354.7	495.2	22433.8	1141.4
(18)	6	3.269	494.0	819.6	25039.3	40751.4	503.6	23932	1141.4
(19)	3	3.300	500.5	829.2	26529.1	43176.1	512	25455.3	1141.4
(20)	0	3.331	507.1	839.1	28036.6	45629.5	520.4	27003.8	1141.4

注:1)除 M_z 以外,表中正常发电工况下的 Q_{Dmax} 、 Q_{D50} 、 Q_i 均为 x 方向剪力;2) M_{Dmax} 、 M_{D50} 、 M_i 均为 y 方向倾覆力矩。

风的湍流模型采用曼恩均匀剪切模型,风轮廓模型采用幂指数模型,指数设置为 0.2。因实际的风场在风速大小、风速方向上均为随机变化的三维参数,故湍流分量设为 3,南/北纬度设为 40° ,地面粗糙程度设为 0.2,则在轮毂高度处可生成三维湍流强度。将平均风速模型、湍流风速模型定义结束后,便可对该风电机组进行 60 s 内的湍流风速仿真,仿真时间设定为 0~60 s。

由 GH Bladed 的 Ultimate Loads 后处理程序可得到塔架各高度处在正常发电工况下和暴风工况下的极限载荷,在此仅列出塔顶处的极限载荷见表 4、表 5,表中给出了与各最大载荷分量(在对角线上的载荷分量最大)相对应的工况。为便于与《指南》得到的计算结果进行比较,沿塔架高度取各截面处对角线上的绝对最大值见表 6。由表 4、表 5 可知,经由 GH Bladed 计算后得到作用于塔架各截面的内力有 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 共 6 个载荷分量,其中对角线上各量值分别为各载荷分量的最大、最小值。比较正常发电工况和暴风工况下的各载荷分量(表 6)可知:1)正常发电工况下的力和力矩均大于暴风工况,原因是在暴风工况下,风力发电机组处于偏航、顺桨、停机状态,接受的风能较小,因此传递到塔架的载荷也比较小;另一方面是由于内蒙古包头地区的基准最大风速较小。在这

些载荷分量中, F_x 、 M_y 这 2 个载荷分量相差最大, 前者在塔顶、塔底分别相差 130%、62.3%, 后者在塔顶、塔底分别相差 47.9%、80%。而 F_y 、 M_x 这 2 个载荷分量相比较, 相差不大(如图 3 所示); 2) M_y 远大于由 F_x 产生的倾覆力矩, 原因是该软件在计算中考虑了塔架与风轮、机舱耦合作用的影响; 3) 2 种工况下塔架各截面的扭矩 M_z 基本无变化, 且正常发电工况下的 M_z 大于暴风工况。

表 4 正常发电工况下塔高 60 m 处的极限载荷
Table 4 Limit loads of the 60 meters tower high under normal power

载荷	极值	工况 (载荷状态)	力矩分量/kNm			力分量/kN		
			M_x	M_y	M_z	F_x	F_y	F_z
M_x	Max	dlc3.1	1816.7	1114.8	-881.6	259.2	-145.1	-1374.6
M_x	Min	dlc1.5	-858.9	-431.9	-284.3	152.1	-60.0	-1374.0
M_y	Max	dlc1.3	1630.9	2107.1	-397.7	100.8	-63.0	-1375.4
M_y	Min	dlc1.3	1422.9	-2818.8	-201.8	321.6	-53.9	-1403.7
M_z	Max	dlc1.1	1553.9	-582.3	2660.0	231.8	-11.7	-1460.2
M_z	Min	dlc1.1	1549.1	791.1	-3446.0	162.2	-9.66	-1314.2
F_x	Max	dlc1.5	458.4	642.3	536.3	787.3	17.4	-1427.6
F_x	Min	dlc3.2	967.3	-1641.3	-1371.0	-336.7	27.6	-1112.5
F_y	Max	dlc3.2	935.5	-1050.0	-908.6	-33.3	167.5	-1127.6
F_y	Min	dlc3.2	1535.0	36.5	-171.3	200.1	-164.7	-1163.7
F_z	Max	dlc3.2	1250.9	285.1	-1849.2	164.4	-7.28	-1056.2
F_z	Min	dlc1.1	1589.0	-827.4	1879.6	155.1	-5.67	-1495.8

注: dlc1.3 为正常发电极端湍流模型, 对角线加粗数值为最大值, 取绝对值最大值。

表 5 暴风工况下塔高 60 m 处的极限载荷
Table 5 Limit load of the 60 meters tower high under storm condition

载荷	极值	工况 (载荷状态)	力矩分量/kNm			力分量/kN		
			M_x	M_y	M_z	F_x	F_y	F_z
M_x	Max	dlc6.1	418.5	1704.6	-425.7	238.5	-21.4	-1377.7
M_x	Min	dlc6.1	-1562.6	1528.1	-366.0	137.6	27.3	-1371.0
M_y	Max	dlc6.1	-236.1	1906.3	-418.3	312.9	-46.6	-1376.5
M_y	Min	dlc6.1	-430.7	-279.7	-417.8	163.3	65.1	-1370.2
M_z	Max	dlc6.1	-3.72	890.4	700.9	112.5	21.6	-1373.7
M_z	Min	dlc6.1	-258.4	1787.1	-1354.6	261.8	8.82	-1391.9
F_x	Max	dlc6.1	-350.3	1428.6	-431.1	342.0	-79.4	-1376.0
F_x	Min	dlc6.1	-847.2	549.5	-177.7	3.59	-14.1	-1387.3
F_y	Max	dlc6.1	-727.9	454.2	-158.4	94.5	118.6	-1374.3
F_y	Min	dlc6.1	-329.5	802.6	-424.8	193.2	-117.0	-1384.9
F_z	Max	dlc6.1	-818.3	239.6	-271.2	178.8	-7.27	-1354.6
F_z	Min	dlc6.1	-763.5	1600.5	-446.8	142.3	-13.7	-1415.2

注: dlc6.1 为停机极端风速模型, 50 年一遇, 对角线加粗数值为最大值, 取绝对值最大值。

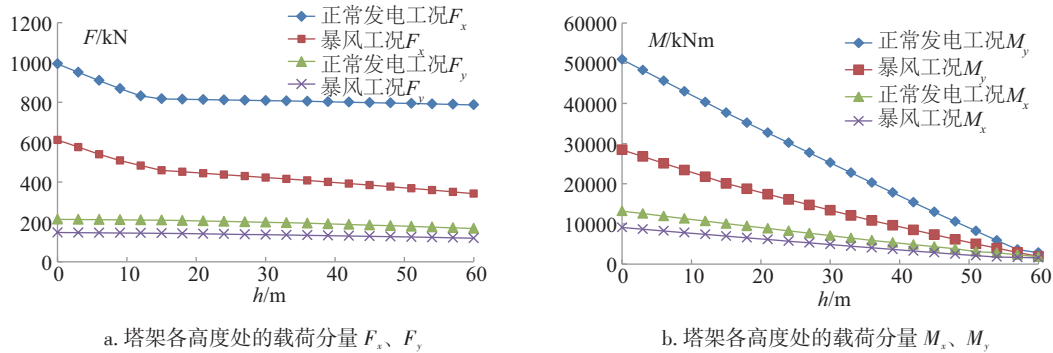


图3 GH Bladed计算结果比较

Fig. 3 Comparison of the calculation results from the GH Bladed

表6 GH Bladed计算结果

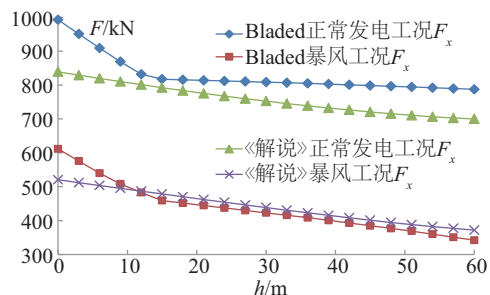
Table 6 Calculation results from the GH Bladed

各部分编号	各部分底部高度/m	正常发电工况					暴风工况				
		力分量/kN		力矩分量/kN			力分量/kN		力矩分量/kN		
		F_x	F_y	M_x	M_y	M_z	F_x	F_y	M_x	M_y	M_z
机舱	60	787.3	167.5	1816.7	2818.8	3446.0	342.0	118.6	1562.6	1906.3	1354.6
(1)	57	789.6	170.9	2312.1	3602.0	3445.6	351.0	120.6	1649.4	2916.7	1354.7
(2)	54	791.9	174.4	2808.4	5882.0	3445.2	359.9	122.7	1750.8	3959.5	1354.7
(3)	51	794.2	177.8	3109.4	8226.1	3444.8	368.8	124.7	2087.4	5017.2	1354.8
(4)	48	796.4	181.1	3812.4	10585.0	3444.5	377.0	126.5	2465.1	6152.9	1354.8
(5)	45	798.5	184.3	4325.8	12955.0	3444.2	384.9	128.2	2858.1	7324.9	1354.8
(6)	42	800.6	187.5	4839.2	15336.0	3444.0	392.8	129.9	3251.1	8496.9	1354.9
(7)	39	802.8	190.6	5352.6	17779.0	3443.7	400.7	131.6	3644.1	9668.9	1354.9
(8)	36	805.0	193.8	5895.1	20241.0	3443.4	408.6	133.2	4037.1	10841.0	1354.9
(9)	33	806.8	196.3	6479.8	22718.0	3443.2	415.8	134.6	4446.8	12098.0	1355.0
(10)	30	808.5	198.5	7077.0	25205	3443.1	422.8	136.1	4864.9	13401.0	1355.0
(11)	27	810.3	200.7	7674.3	27691.0	3443.0	430.0	137.6	5282.9	14715.0	1355.0
(12)	24	812.0	202.9	8271.5	30177.0	3442.8	437.3	139.0	5701.0	16051.0	1355.1
(13)	21	813.7	205.0	8868.7	32663.0	3442.8	444.5	140.5	6119.0	17387.0	1355.1
(14)	18	815.4	207.2	9466.0	35149.0	3442.7	451.8	142.0	6537.1	18724.0	1355.1
(15)	15	817.2	209.4	10063.0	37635.0	3442.5	459.0	143.5	6955.1	20060.0	1355.1
(16)	12	831.9	210.2	10689.0	40288.0	3442.5	482.9	144.2	7383.2	21730.0	1355.2
(17)	9	868.8	211.0	11314.0	42941.0	3442.5	508.1	144.8	7811.4	23404.0	1355.2
(18)	6	909.1	211.8	11940.0	45594.0	3442.4	539.8	145.5	8239.5	25082.0	1355.3
(19)	3	950.7	212.6	12565.0	48246.0	3442.4	575.7	146.2	8667.6	26761.0	1355.3
(20)	0	992.7	213.4	13190.0	50899.0	3442.3	611.5	146.9	9095.8	28439.0	1355.4

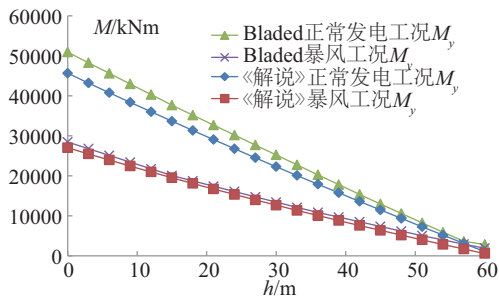
注:1) F_z 为风轮、机舱和塔架自重,在表中未列出;2)GH Bladed 软件计算时塔架各部分中央外径与《指南》计算中完全相同。

3 极限风载荷比较

由前述 2.1 节可知,采用《风力发电设备塔架结构设计指南及解说》中的计算方法(后文简称《指南》),仅得到正常发电工况和暴风工况下塔架各截面的 x 向剪力和 y 向倾覆力矩,本文中仅比较 F_x 、 M_y 这 2 个载荷分量如图 4 所示。由图 4 和表 3、表 6 可以发现,在正常发电工况下,GH Bladed 计算得到的 F_x 均大于《指南》的计算结果,最大相差达到 18.3%。而在暴风工况下,GH Bladed 计算得到的 F_x 在沿塔架高度 9~60 m 的范围内均略小于《指南》计算结果,最大相差约 8%;在底部 9 m 范围内 GH Bladed 计算得到的 F_x 大于《指南》计算结果,在塔架底部相差最大,为 17.5%。



a. 塔架各高度处的载荷分量 F_x



b. 塔架各高度处的载荷分量 M_y

图 4 2 种方法的计算结果比较

Fig. 4 Comparison of calculation results on two methods

比较 2 种计算方法得到的 M_y 可发现,在正常发电工况下,除塔顶(60 m)弯矩 M_y 计算差异超出一倍外,其他各截面计算差异均在 15%以内。这是由于 2 种标准计算方法、湍流强度、考虑工况的详尽程度等均不同,产生计算偏差是不可避免的。另外,由 GH Bladed 计算时,塔顶倾覆弯矩 M_y 最大值出现在 DLC1.3 工况,此工况为极端湍流模型(ETM)。其他各截面的极限载荷 M_y 均出现在

DLC1.5 工况,此工况为极端运行阵风(EOG1)。由于风况不同,塔架载荷与其高度并不呈线性关系。总体而言,由 GH Bladed 计算得到的载荷比《指南》计算得到的载荷值大。在暴风工况下,塔架 42 m 高度以下 2 种计算方法得到的 M_y 值相差在 10%之内。在 42 m 以上靠近塔顶部位计算差异较大,GH Bladed 计算值比《指南》计算值高出 2.39 倍。需要说明的是,在该工况下计算时 M_y 均出现在 DLC6.1 工况下。

相比较而言,《指南》中仅考虑暴风工况下的最大扭矩计算。在该种工况下,由 GH Bladed 计算得到的最大扭矩要比《指南》大 19%。

4 结 论

1) GH Bladed 和《风力发电设备塔架结构设计指南及解说》2 种计算方法相比较,前者对风场的模拟与现实风场更接近,并且考虑了风力发电机组的控制;后者认为正常发电时的荷载比其他工况下大很多,因此仅对正常发电工况和暴风工况下的最大风荷载进行了评估。

2) 由 GH Bladed 计算后可得到作用于塔架各截面的内力有 F_x 、 F_y 、 F_z 、 M_x 、 M_y 、 M_z 共 6 个载荷分量,其中正常发电工况下的力和力矩均大于暴风工况。而根据《指南》中的计算方法,可得到正常发电工况以及暴风工况下塔架各截面的剪力、倾覆力矩以及扭矩,且塔架在正常发电工况下的剪力和倾覆力矩均大于暴风工况。

3) 2 种计算方法相比较可知,在正常发电和暴风工况下由 GH Bladed 计算得到的极限风载荷均大于《风力发电设备塔架结构设计指南及解说》,尤其对于载荷分量 M_y ,在塔架顶部计算差异超过 1 倍。说明对于风力发电机塔架这种典型的“高鸡腿哑铃式”高耸结构,塔顶部位受风轮、机舱的影响比较大,在载荷计算时必须考虑。

[参考文献]

- [1] 马林静, 刘 军, 王树军. 风电机组载荷计算标准的对比研究[J]. 太阳能学报, 2015, 36(1): 71—77.
- [1] Ma Linjing, Liu Jun, Wang Shujun. Comparison research of load calculation standard for wind turbines [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2015, 36(1): 71—77.

- [2] Burton T, Sharpe D, Jenkins N, et al. Wind energy handbook[M]. New York: John Wiley & Sons, Ltd., 2001.
- [3] 李 娟, 刘江波, 冯红岩. 风况仿真设定对风机载荷计算的影响[J]. 机械设计与制造, 2012, (5): 194—196.
- [3] Li Juan, Liu Jiangbo, Feng Hongyan. The effect of wind condition setting simulated on load calculation of wind turbines [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012, (5): 194—196.
- [4] 邓 英, 周 峰, 田 德, 等. 不同风湍流模型的风电机组载荷计算研究[J]. 太阳能学报, 2014, 35 (12): 2395—2499.
- [4] Deng Ying, Zhou Feng, Tian De, et al. Research on load calculation of wind turbine for different wind turbulence model [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2014, 35(12): 2395—2499.
- [5] IEC 61400-1. Wind Turbine-Part 1: Design requirement (3rd Ed.)[S]. 2005.
- [6] Germanischer Lloyd. Guideline for the certification of wind turbine [J]. Germanischer Lloyd Industrial Service GmbH, 2010.
- [7] 中国船级社, 风力发电机组规范[S]. 北京: 人民交通出版社, 2008.
- [7] China Classification Society, National standard of wind turbines[S]. Beijing: China Communication Press, 2008
- [8] 日本土木学会. 风力发电设备塔架结构设计指南及解说[M]. 祝 磊, 许 楠, 高 颖(译). 北京: 中国建筑工业出版社出版, 2014.
- [8] Japan Society of Civil Engineers. Guidelines for design and explanation of wind power generation equipment tower structure [M]. Translation by Zhu Lei, Xu Nan, Gao Ying. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [9] 夏雪莲. 包头地区风和风能资源[J]. 内蒙古气象, 2012, (1): 31—33.
- [9] Xia Xuelian. Wind and wind energy resources of Baotou region[J]. Meteorolgy Journal of Inner Mongolia, 2012, (1): 31—33.

CALCULATION AND COMPARATIVE STUDY OF ULTIMATE WIND LOADS ON WIND TURBINE TOWER

Gao Chunyan^{1,2}, Liu Ze², Shi Zhiyu¹

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China;

2. School of Civil Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: In the 2 MW horizontal axis wind turbine simulation model, using GH Bladed and the Japanese "Guidelines for Design and Explanation of Wind Power Generation Equipment Tower Structure" to calculate the ultimate wind load of the wind turbine tower respectively, and studied the difference in normal power conditions and storm conditions of two kinds of calculation methods. The results showed that the limit wind load in the normal power generation condition is higher than that of the storm condition by the two calculation methods. The results calculated by the Bladed GH are too large. The main reason of the difference of the limit wind load is two kinds of calculation methods, which are the condition of wind condition, the type of working condition and the different theoretical basis. For the wind turbine tower is a kind of typical "high leg dumbbell" high-rise structure, tower parts influence wind wheel, the cabin is relatively large, the calculation results using the GH Bladed software is more accurate.

Keywords: wind turbines; towers; ultimate loads; standard