

风切变指数对于风电机组载荷特性影响研究

付德义, 薛 扬, 边 伟, 周士栋, 龚利策

(中国电力科学研究院有限公司新能源与储能运行控制国家重点实验室, 北京 100192)

摘 要: 分析风切变指数对风电机组机械载荷特性的影响,并以某2 MW风电机组载荷测试数据为例,对相同风速不同风切变情况下的载荷数据进行分析。研究风切变指数对风电机组极限载荷、疲劳等效载荷的影响。最后运用GH Bladed软件,对相同外部条件不同风切变指数下的风电机组载荷进行仿真计算,验证风切变指数与风电机组载荷特性之间的内在相关性。测试数据与仿真结果均表明,风电机组结构部件载荷特性与风切变指数强相关,且随着风切变指数的增加,极限载荷与疲劳等效载荷也随之变大。风切变指数的增长率与极限载荷增长率、疲劳等效载荷增长率均呈现二次函数关系,且风切变指数每增加约5%,极限载荷增加约0.1%,疲劳等效载荷增加约0.5%。

关键词: 风力发电; 结构载荷; 疲劳; 载荷测试; 风切变指数

中图分类号: TK83; TK81 **文献标识码:** A

0 引 言

近年来,随着风力发电技术的不断发展与成熟,风电装机容量也在不断增大,风电机组自身的结构与疲劳安全也逐渐受到关注^[1]。由于风电机组的载荷特性直接关系到机组自身的结构安全,因此,也成为各方关注的焦点之一。然而,由于风电机组长期运行于恶劣的自然环境中,作用于风电机组各个结构部件上的载荷异常复杂,其中包括风速湍流脉动、风切变、塔影效应等引起的气动载荷;叶片旋转过程中的重力载荷、惯性载荷、风载荷等。这些因素相互叠加、相互耦合作用,综合考虑所有因素将难以分辨出各自的特点,本文仅就风切变指数对于风电机组载荷特性的影响情况进行仿真与实证研究。

文献[2~5]通过仿真手段指出,当风切变指数较大时,风电机组叶片的使用寿命会受到影响,同时,还可能引起较大的瞬态载荷,最终造成风电机组疲劳破坏,但是无实际测试数据支撑。也有学者对如何减小风电机组的疲劳载荷,提高风电机组性能,延长机组使用寿命等进行了相关的仿真研究,但未见有关于风切变对风电机组极限与疲劳载荷

影响的实测与仿真综合研究^[6~9]。

因此,开展风切变指数与风电机组结构部件载荷特性之间的内在特性研究十分必要。本文基于实测风电机组载荷数据,分析风电机组结构部件极限与疲劳载荷同风切变指数之间的关系。同时,结合仿真数据,对测试数据分析结论进行验证。

1 风切变指数与风电机组载荷特性分析

1.1 风切变指数

风切变效应可采用对数律或指数律分布进行描述。在风电行业,通常运用对数律分布来描述并计算风切变。风切变指数的对数律分布可定义为:

$$\alpha = \ln \left(\frac{\bar{V}(z)}{\bar{V}(z_s)} \right) / \ln \left(\frac{z}{z_s} \right) \quad (1)$$

式中, α —— 风切变指数; $\bar{V}(z)$ 、 $\bar{V}(z_s)$ —— 高度为 z 和 z_s 处的风速。当 α 为零时,表示风速随高度不发生变化。

风切变指数 α 是用来衡量风速随高度变化的一个指标。风切变指数与风电机组所处位置的地形、地貌以及粗糙度有关。一般风切变指数随着地

收稿日期: 2017-04-12

基金项目: 国家科技支撑计划(2015BAA07B01); 国家电网公司科技项目(NYB17201600300)

通信作者: 付德义(1984—), 男, 硕士、高级工程师, 从事风电机组机械载荷、功率特性测试方法与仿真技术方面的研究。

fudeyi@epri.sgcc.com.cn

表粗糙度的增加而增大。在风电机组仿真计算过程中,风切变指数采用一个常规的数值,即假定风切变指数为 0.2。然而,根据实际测试情况看,该风切变指数偏保守,特别是在丘陵地区或地形较为复杂的地区,风切变指数会出现较大的波动,甚至还有负切变的情况出现。

图 1 给出了河北省张家口市张北县国家能源大型风电并网系统研发(实验)中心实测风切变指数情况。

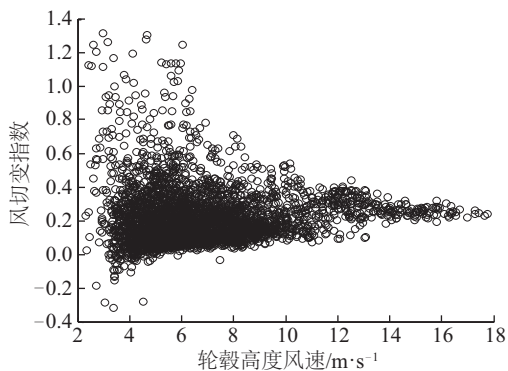


图1 风切变指数随风速变化

Fig. 1 Wind shear exponent changes with wind speed

由图 1 可知,同一区域的风切变指数并非恒定不变,而是有较大的波动范围。该区域的风切变指数多数维持在 0~0.4 范围内,整个风切变指数的变化范围为-0.4~1.4。

本文给出了风切变指数为 0.2、0.3、0.4 情况下的风廓线,高度范围覆盖整个风轮扫掠面,即 20~140 m 高度范围(假定轮毂中心高度为 80 m,风轮直径为 120 m)。其中,风切变指数参考高度为 20 m,假设参考高度处的风速为 5 m/s,如图 2 所示。

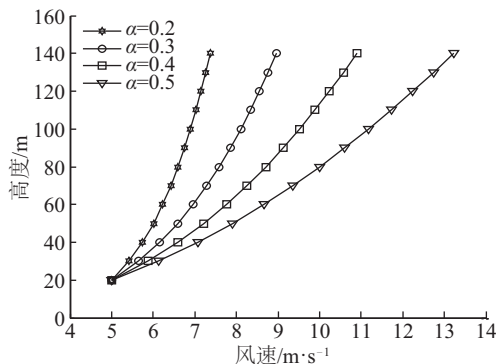


图2 不同风切变指数下的风廓线

Fig. 2 Wind profiles at different wind shear exponents

1.2 风切变指数与风电机组载荷

本质上讲,风切变指数反映的是风速大小随高度变化的波动情况。风切变越大,空气流场内同一截面的风速特征值变化越大。这种风速特征值大小的变化,直接导致整个风轮扫掠平面内结构部件受力大小的变化。

对于风电机组而言,由于叶片和塔筒自身结构尺寸较大,在空气场中感受风速大小变化带来的影响更为强烈,特别是叶片的挥舞方向以及塔筒的俯仰弯矩(前后方向)载荷。

以塔筒俯仰弯矩为例,塔筒承受的载荷主要来源于风电机组自身产生的偏心力矩以及风载荷导致的力矩。当气流流经风电机组叶片旋转平面时,对叶片产生巨大的推力,然后通过风电机组传动链,最终传递至塔筒底部。因此,塔筒底部俯仰弯矩特征幅值随外界条件变化较明显。为了分析风切变指数与风电机组结构部件载荷特性之间的关系,本文以塔筒底部俯仰弯矩为例进行分析。

此处,为了便于分析风电机组塔筒底部载荷情况,将塔筒近似作为一个典型的悬臂梁结构进行处理^[10-12],其弹性方程可定义为:

$$m(z)\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + c(z)\frac{\partial y}{\partial t} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}\left[EI(z)\frac{\partial^2 y}{\partial z^2} \right] = p(z)f(t) \quad (2)$$

式中, $m(z)$ 、 $c(z)$ 、 $I(z)$ 、 $p(z)$ ——沿高度方向上的质量、阻尼系数、惯性矩和水平作用力; E ——杨氏模量; $f(t)$ ——时间的函数。

位移按照振型 $X_j(z)$ 可分解为:

$$y(z,t) = \sum_{j=1}^{\infty} X_j(z)q_j(t) \quad (3)$$

式中, $X_j(z)$ —— j 阶振型在高度 z 处的坐标; $q_j(t)$ ——广义坐标,由于振型的正交性,假设阻尼也符合正交性,将 j 阶振型的阻尼比、自振频率代入式(2),得到广义坐标方程:

$$\ddot{q}_j(t) + 2\zeta_j\omega_j\dot{q}_j(t) + \omega_j^2q_j(t) = p_j(t) \quad (4)$$

$$p_j(t) = \frac{\int_0^H \int_0^{L_x(z)} W(X,z)X_j(z)dXdzf(t)}{\int_0^H m(z)X_j^2(z)dz} \quad (5)$$

式中, $W(X,z)$ ——高度 z 处任一水平位置 X 的面载荷; $L_x(z)$ ——水平宽度; ω —— j 阶振型角频率。

忽略影响较小的交叉项,仅考虑一阶振型,则位移响应的根方差为:

$$\sigma_y(z) = X_j(z) \sqrt{\sum_{-\infty}^{+\infty} |H_j(j\omega)|^2 S_{yy} \omega d\omega} \quad (6)$$

考虑空间响应因子 μ_y , 高度为 z 处的风载荷为:

$$P_m = m(z) \omega^2 \mu_y \sigma_y(z) \quad (7)$$

则考虑空间相关性的风振系数为:

$$\beta(z) = 1 + \frac{P_m(z)}{KK_z(z)W_0L_s(z)} \quad (8)$$

式中, P_m ——质点 m 的风载荷; K ——塔筒体型系数; $K_z(z)$ ——平均风压随高度变化的系数; W_0 ——参考高度的基本风压。风切变指数不同,则风压随高度变化的系数将不同,即风切变指数的变化直接影响 $K_z(z)$ 的取值,进而对风电机组塔筒的载荷产生直接影响。

本文结合实测数据以及仿真计算重点研究塔筒底部俯仰弯矩载荷受风切变指数变化的影响情况。

2 相同外部条件不同风切变指数情况下的载荷测试

根据 IEC TS 61400-13 标准要求,本文针对某 2 MW 双馈型风电机组开展机械载荷测试^[13-15],同时采集气象数据(风速、风向等)、运行数据(功率、桨距角、偏航方位角、风轮转速等)、机械载荷量(叶片摆振与挥舞弯矩、塔筒俯仰与倾覆弯矩等),从而得到不同工况下的风电机组各主要结构部件的载荷响应。为了研究相同风速条件下,风切变指数对于风电机组机械载荷的影响,本文分别提取风向、偏航角、桨距角、转速、功率等外部条件基本相同仅风切变指数不同的正常发电工况数据进行研究。

同时,为进一步降低由于风速幅值的大小对机械载荷产生的影响,本文选取外部条件基本相同,平均风速约为 10 m/s 的 3 个 10 min 数据(风切变指数分别为 0.2、0.3、0.4),分别给出其 10 min 实测风速变化曲线与载荷响应曲线,如图 3、图 4 所示。

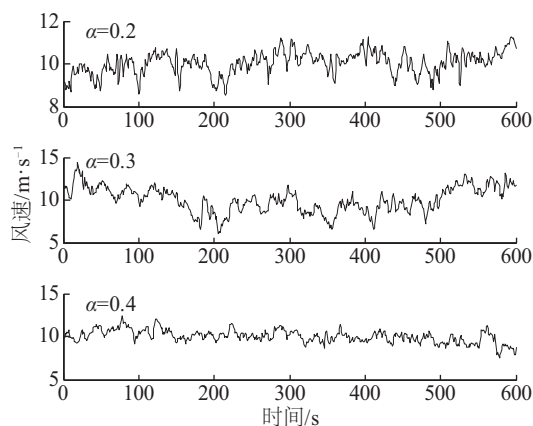


图3 轮毂高度风速($\alpha=0.2\sim0.4$)

Fig. 3 Hub height wind speed($\alpha=0.2\sim0.4$)

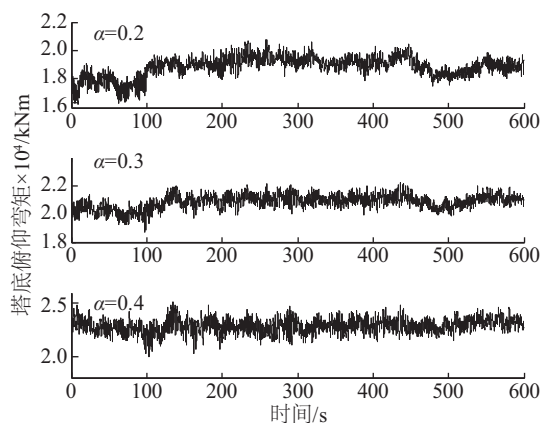


图4 塔底俯仰弯矩($\alpha=0.2\sim0.4$)

Fig. 4 Tower base tilt moment($\alpha=0.2, 0.3$ and 0.4)

由图 4 可知,外部条件相同仅风切变指数不同的情况下(无变桨、无偏航),塔底俯仰弯矩载荷随风切变指数的增加逐渐增大。风切变指数为 0.2、0.3、0.4 这 3 种情况下的载荷 10 min 载荷统计情况如表 1 所示。

表1 不同风切变情况下的塔底俯仰方向弯矩($\alpha=0.2\sim0.4$)

Table 1 Tower base tilt moment at different wind shear exponents($\alpha=0.2, 0.3$ and 0.4)

风切变指数	载荷最大值/ kN·m	载荷最小值/ kN·m	变化幅值/ kN·m
$\alpha=0.2$	20741.6	16170.3	4571.3
$\alpha=0.3$	22190.3	17324.1	4866.2
$\alpha=0.4$	25096.7	19955.0	5141.7

基于实测数据,提取风切变指数在 0.0~0.2 以

及 0.2~0.4 之间的数据,得出塔底俯仰弯矩平均值随轮毂中心高度风速变化的曲线,如图 5 所示。

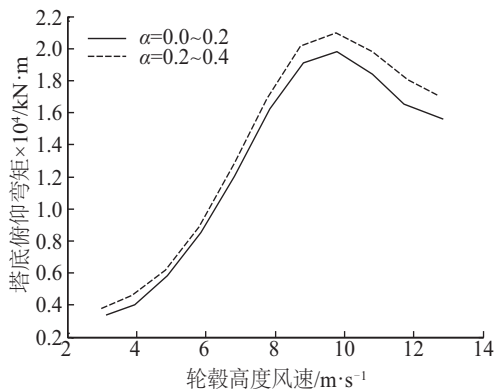


图5 不同风切变情况下塔底俯仰弯矩(实测)

Fig. 5 Tower base tilt moment at different wind shear exponent (test)

由表 1 及图 5 可知,随着风切变指数的增大,塔底俯仰弯矩也随之变大。而且,风切变指数越大,塔底俯仰弯矩振幅也相应增大。

3 相同外部条件不同风切变指数情况下的载荷仿真

为了验证风切变指数与载荷之间的内在联系,本文运用 GH BLADED 软件^[16,17],对被测 2 MW 双馈型风电机组进行载荷仿真计算。风电机组主要参数如表 2 所示。

表2 风电机组参数

Table 2 Wind turbine parameters

参数	值	参数	值
风电机组类型	水平轴、双馈	额定电压/kV	0.69
风轮直径/m	120	额定风速/m·s ⁻¹	9.1
轮毂高度/m	80	额定电流/A	1760
额定功率/kW	2000	额定频率/Hz	50
额定视在功率/kVA	2105	转速范围/r·min ⁻¹	7.3~14.0

基于该风电机组的 GH BLADED 模型,结合实测外部条件数据(风速、风向、偏航角度等),并分别设置风切变指数为 0.2、0.3、0.4 及 0.5。仿真得到 4 种不同风切变指数工况下的时间历程曲线,如图 6 所示。

对上述 4 种不同风切变指数情况下的数据进行统计分析,统计结果如表 3 所示。

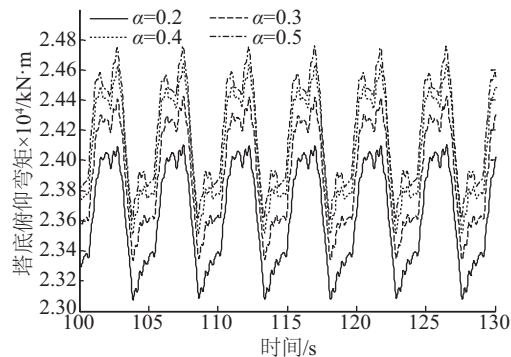


图6 塔底俯仰弯矩仿真(α=0.2~0.5)

Fig. 6 Tower base tilt moment simulation (α=0.2~0.5)

表3 不同风切变情况下的塔底俯仰方向弯矩(α=0.2~0.5)

Table 3 Tower base tilt moment simulation at different wind shear exponent (α=0.2, 0.3, 0.4 and 0.5)

风切变指数α	塔底俯仰弯矩/kNm		
	平均值	最大值	最小值
0.2	23632.5	24265.0	22943.0
0.3	23910.7	24580.5	23208.1
0.4	24095.1	24794.1	23360.3
0.5	24192.3	24971.4	23463.6

以α=0.2 的工况为比较基准,得出另外 3 种不同风切变指数情况下的塔底俯仰弯矩极限载荷的增长率,如表 4 所示。

表4 不同风切变情况下的塔底俯仰方向弯矩增长率(α=0.2~0.5)

Table 4 Tower base tilt moment growth rate at different wind shear exponent (α=0.2, 0.3, 0.4 and 0.5)

风切变指数α	塔底俯仰弯矩增长率/%		
	平均值	最大值	最小值
0.2	—	—	—
0.3	1.18	1.30	1.16
0.4	1.96	2.18	1.82
0.5	2.37	2.91	2.27

进一步,本文在保持外在条件不变的情况下,对风切变指数在 0.2~0.5 之间的工况进行逐一仿真计算,风切变指数增加间隔设置为 0.01,共 31 个工况。仿真计算结果,如图 7 所示。

同样,以α=0.2 的工况为比较基准,得出对应的不同风切变指数情况下塔底俯仰弯矩极限载荷的

增长率。运用最小二乘法,对风切变指数的增长率与极限载荷的增长率之间的关系进行拟合,结果如图 8 所示。

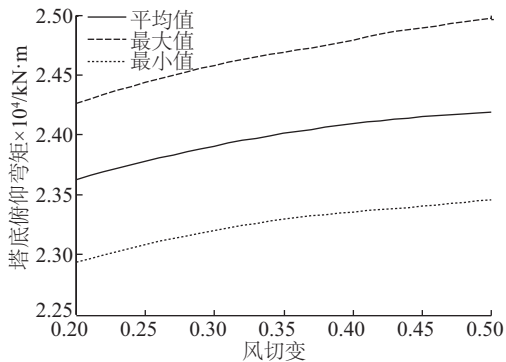


图 7 塔底俯仰弯矩随风切变指数变化(仿真)

Fig. 7 Tower base tilt moment changes with wind shear exponent(simulation)

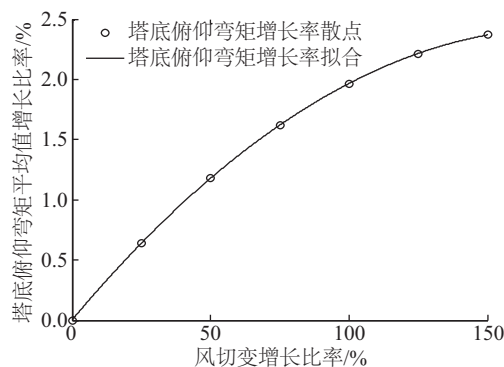


图 8 塔底俯仰弯矩增长率与风切变增长率关系

Fig. 8 Relationship between tower base tilt moment growth rate and wind shear exponent growth rate

由表 3、表 4 及图 7、图 8 可知,随着风切变指数的增大,塔底俯仰弯矩的极限载荷也随之增大。极限载荷增长率与风切变指数增长率之间呈现二次函数关系,且风切变指数每增加约 5%,极限载荷增加约 0.1%。

为进一步探究风切变指数不同的情况下^[18],风切变对于机械载荷特性的影响,本文引入疲劳等效载荷的概念,从疲劳损伤的角度探究风切变指数与机械载荷的关系。疲劳等效载荷是一个概括性的载荷,是指在给定的时间范围(如 10 min)以给定的频率(如 50 Hz)出现的总的循环次数施加这个载荷时,它所造成的累积疲劳损伤与 10 min 时间历程曲线对结构部件造成的累积疲劳损伤相同。疲劳等效载荷的定义为:

$$R_{eq} = \left(\frac{\sum R_i^m \times n_i}{n_{eq}} \right)^{m^{-1}} \quad (9)$$

式中, R_{eq} ——疲劳等效载荷; n_i ——循环数; R_i ——循环幅值; n_{eq} ——给定循环次数; m ——材料的特性参数(材料 $S-N$ 曲线中的斜率)。

本文分别对不同风切变指数情况下的塔底俯仰弯矩时间序列数据进行雨流计数分析,计算得出其对应的疲劳等效载荷。表 5 分别给出了($v=10.02$ m/s, $\alpha=0.2$)、($v=9.99$ m/s, $\alpha=0.3$)、($v=10.01$ m/s, $\alpha=0.4$)、($v=10.02$ m/s, $\alpha=0.5$) 4 种正常发电工况下,塔底俯仰弯矩疲劳等效载荷(m 值分别取 4、8、12)。

表 5 不同风切变情况下塔底俯仰弯矩疲劳等效载荷 ($\alpha=0.2\sim0.5$)

Table 5 Tower base tilt fatigue equivalent moment at different wind shear exponents($\alpha=0.2, 0.3, 0.4$ and 0.5)

风切变 指数 α	等效载荷/kN·m		
	$m=4$	$m=8$	$m=12$
0.2	694.0	848.3	913.5
0.3	730.5	892.1	959.2
0.4	758.0	925.5	994.7
0.5	775.2	946.6	1018.1

结合表 5,以 $\alpha=0.2$ 的工况为比较基准,计算得出其余风切变指数工况相对于其的增长率,如表 6 所示。

表 6 不同风切变情况下塔底俯仰弯矩疲劳等效载荷增长率($\alpha=0.2\sim0.5$)

Table 6 Tower base tilt fatigue equivalent moment growth rate at different wind shear exponents($\alpha=0.2, 0.3, 0.4$ and 0.5)

风切变 指数 α	等效载荷增长率/%		
	$m=4$	$m=8$	$m=12$
0.2	—	—	—
0.3	5.26	5.16	5.00
0.4	9.22	9.10	8.89
0.5	11.70	11.59	11.45

同时,本文计算上述 31 个工况(风切变指数 0.2~0.5 变化,间隔 0.01)的疲劳等效载荷,结果如图 9 所示。

同样,以 $\alpha=0.2$ 的工况为比较基准,得出对应的

不同风切变指数情况下的塔底俯仰弯矩疲劳等效载荷的增长率。运用最小二乘法,对风切变指数的增长率与疲劳等效载荷的增长率之间的关系进行拟合,结果如图 10 所示。

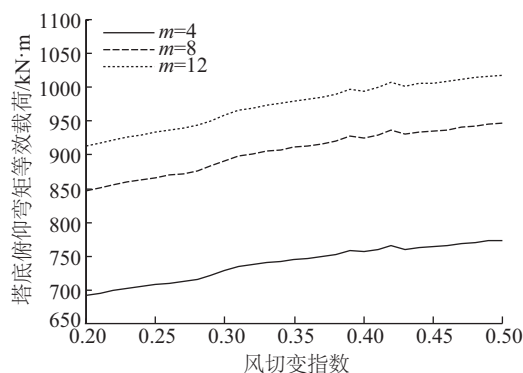


图9 塔底俯仰弯矩等效载荷(仿真)

Fig. 9 Tower base tilt fatigue equivalent moment(simulation)

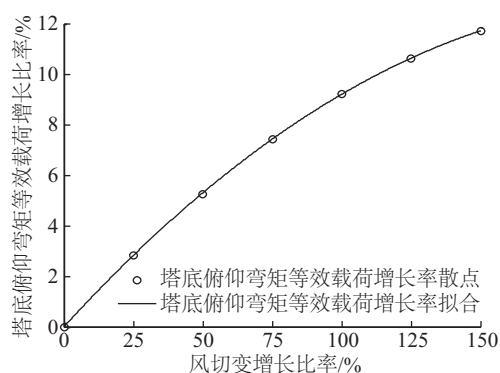


图10 塔底俯仰弯矩等效载荷增长率与风切变增长率关系

Fig. 10 Relationship between tower base tilt fatigue equivalent moment growth rate and wind shear exponent growth rate

由表 5、表 6 及图 9、图 10 可知,随着风切变指数的增大,塔底俯仰弯矩的疲劳等效载荷也随之增大。疲劳等效载荷增长率与风切变指数增长率之间呈现二次函数关系,而且风切变指数每增加约 5%,疲劳等效载荷增加约 0.5%。

4 结 论

本文通过分析某 2 MW 双馈型风电机组载荷测试数据,重点分析相同外部条件下,风切变指数对于风电机组极限载荷与疲劳载荷的影响。简要阐述了风切变指数变化导致风电机组极限与疲劳载荷变化的机理。分析结果表明,风切变指数与风电

机组极限载荷、疲劳等效载荷强相关,随着指数的增加,极限载荷与疲劳等效载荷也随之增大。极限载荷增长率、疲劳等效载荷增长率与风切变指数增长率之间均呈现二次函数关系,而且风切变指数每增加约 5%,极限载荷增加约 0.1%,疲劳载荷增加约 0.5%。

由此可知,在风电机组载荷设计、风电场微观选址过程中,需提前确定和考虑风切变的大小。对于风切变指数较大的地区,风电机组设计载荷应考虑以适当的安全系数,以保证风电机组的极限与疲劳寿命安全。

[参考文献]

- [1] 付德义,秦世耀,薛 扬,等. 风电机组低电压穿越过程机械载荷特性研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(5): 1100—1106.
- [1] Fu Deyi, Qin Shiyao, Xue Yang, et al. Wind turbine mechanical load characteristics research [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2016, 37(5): 1100—1106.
- [2] 盛振国,王树军,付德义,等. 风电机组测量载荷工况研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(2): 303—308.
- [2] Sheng Zhenguo, Wang Shujun, Fu Deyi, et al. Comparative study on measurement load cases of wind turbine generator systems [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2016, 37(2): 303—308.
- [3] 林志明,潘东浩,王贵子,等. 双馈式变速变桨风力发电机组的转矩控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(32): 118—124.
- [3] Lin Zhiming, Pan Donghao, Wang Guizi, et al. Torque control of double-fed variable speed variable pitch wind turbine [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2009, 29(32): 118—124.
- [4] 付德义,秦世耀. 基于风力发电机组载荷测试的设计载荷验证[J]. 可再生能源, 2013, 31(8): 38—41.
- [4] Fu Deyi, Qin Shiyao. Wind turbine design load verification based on load measurement [J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(8): 38—41.
- [5] 王 欣. 水平轴风力机气动性能与结构动力特性研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [5] Wang Xin. Analysis of aerodynamic performance and structural dynamic characteristics for horizontal wind turbine [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012.

- [6] 窦修荣, 黄秋珊, 宋宪耕, 等. 大型水平轴风轮转子/塔架耦合系统的气动弹性稳定性分析[J]. 太阳能学报, 1997, 18(3): 278—284.
- [6] Dou Xiurong, Huang Qiushan, Song Xiangeng, et al. Coupled rotor/tower aeroelastic stability analysis of large horizontal-axis wind turbine [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 1997, 18(3): 278—284.
- [7] 李本立, 安玉华. 风机塔架俯仰与桨叶挥舞的耦合运动[J]. 太阳能学报, 1997, 18(1): 65—67.
- [7] Li Benli, An Yuhua. Coupled motion of the wind turbine tower pitching plus blades in flapping[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 1997, 18(1): 65—67.
- [8] 张晨晨. 兆瓦级风力发电机组的动力学分析[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2007.
- [8] Zhang Chenchen. Dynamic analysis on MW grade wind turbine[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2007.
- [9] 单光坤, 王晓东, 姚兴佳, 等. 兆瓦级风力发电机组的稳定性分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(7): 786—791.
- [9] Shan Guangkun, Wang Xiaodong, Yao Xingjia, et al. Stability analysis on MW wind turbine[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2008, 29(7): 786—791.
- [10] 王永智, 陶其斌, 周必成, 等. 风力机塔架的结构动力分析[J]. 太阳能学报, 1995, 16(2): 162—169.
- [10] Wang Yongzhi, Tao Qibin, Zhou Bicheng, et al. Dynamic analysis of wind power turbine's tower structures [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 1995, 16(2): 162—169.
- [11] 陈 严, 欧阳高飞, 叶枝全, 等. 大型水平轴风力机传动系统的动力学研究[J]. 太阳能学报, 2003, 24(5): 729—734.
- [11] Chen Yan, Ouyang Gaofei, Ye Zhiquan, et al. Dynamic analysis of HAWT drive-train[J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2003, 24(5): 729—734.
- [12] 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.
- [12] Liu Hua, He Yulin, Jin Xin, et al. Joint-analysis of stall-regulated turbine's performance based on GDW [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2008, 29(3): 343—348.
- [13] Hansen Martin O L. 风力机空气动力学[M]. 肖劲松(译), 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [13] Hansen Martin O L. Aerodynamics of wind turbines[M]. Tranuslation by Xiao Jinsong, Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [14] 薛 扬, 付德义, 焦 渤, 等. 一种符合IEC 61400-13标准的风电机组载荷测试系统 [P]. 中国: 201010513594, 2011-02-16.
- [14] Xue Yang, Fu Deyi, Jiao Bo, et al. A wind turbine load measurement system based on the IEC 61400-13 [P]. China: 201010513594, 2011-02-16.
- [15] 付德义, 薛 扬, 秦世耀, 等. MW级风力发电机组载荷测试方法研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(3): 65—68.
- [15] Fu Deyi, Xue Yang, Qin Shiyao, et al. MW class wind turbine load measurement method research[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(3): 65—68.
- [16] 宁建国, 宋卫东, 任会兰, 等. 冲击载荷作用下材料与结构的响应与防护[J]. 固体力学学报, 2010, 31(5): 532—552.
- [16] Ning Jianguo, Song Weidong, Ren Huilan, et al. Response and protection of matirials and structures under impact loadings [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics, 2010, 31(5): 532—552.
- [17] 任廷鸿. 冲击载荷下疲劳损伤力学及锻锤基础的疲劳损伤分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [17] Ren Tinghong. Fatigue damage mechanics under impact load and analysis of fatigue damage for hammer-foundation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [18] 严 刚. 航空结构冲击载荷与损伤识别技术方法研究 [D]. 南京: 南京航空航天大学, 2009.
- [18] Yan Gang. Research on impact load and damage identification techniques and methods for aircraft structures [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2009.

EFFECTS OF WIND SHEAR EXPONENTS ON WIND TURBINE LOAD CHARACTERISTICS

Fu Deyi, Xue Yang, Bian Wei, Zhou Shidong, Gong Lice

*(State Key Laboratory of Operation and Control of Renewable Energy & Storage Systems, China Electric Power Research Institute,
Beijing 100192, China)*

Abstract: The theoretical derivation of the effects of wind shear exponent on the wind turbine ultimate and fatigue load was carried out in this article. Based on a 2 MW wind turbine mechanical load test data, the wind turbine load characteristics with same external conditions but different wind shear exponents were analyzed. The GH BLADED software was used to simulate the wind turbine mechanical load with same external conditions but different wind shear exponents. The inner correlation between wind shear exponent and the fatigue equivalent and ultimate load of wind turbine was verified with the simulation results. Both test and simulation results showed that the mechanical load characteristics of wind turbine structural components strongly associated with the wind shear exponent. The relationship between wind shear exponent growth rate and ultimate load growth rate, together with the fatigue equivalent load growth rate show a quadratic function, while the wind shear exponent increases about 5%, the ultimate load increases about 1%, and the fatigue equivalent load will increase about 0.5%.

Keywords: wind power; structural loads; fatigue; load test; wind shear exponent