

风电机组尾流与疲劳载荷关系分析

邓 英, 李嘉楠, 刘河生, 庞辉庆, 田 德

(华北电力大学可再生能源学院, 北京 102206)

摘 要: 为了研究风电机组尾流对下游风电机组载荷的影响, 假设了几个重要尾流参数: 上下游风电机组间距、上游风电机组推力系数、湍流强度等。采用 Bladed 软件和 Matlab 幅频程序, 分别对 1.5 与 3.0 MW 双馈式风电机组进行各参数与载荷响应的关系计算。结果表明: 风轮处风速会随着推力系数的增大非线性减小; 风电机组处于尾流影响范围内时, 在风速和推力系数相同的条件下, 通常湍流强度受尾流影响后减小使载荷增大, 但当推力系数对载荷的影响起主导作用时, 虽然湍流强度受尾流影响后减小但载荷会增大; 当风速大于额定风速时, 应采用变桨控制减小推力系数, 以减小风电机组的疲劳损伤。

关键词: 风电机组; 计算机仿真; 模型; 间距; 推力系数; 风速; 尾流; 疲劳载荷

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.10.031

中图分类号: TK83

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-10-0239-06

邓 英, 李嘉楠, 刘河生, 庞辉庆, 田 德. 风电机组尾流与疲劳载荷关系分析[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 239-244. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.10.031 http://www.tcsae.org
Deng Ying, Li Jianan, Liu Hesheng, Pang Huiqing, Tian De. Analysis on relationship between wake and fatigue load of wind turbines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 239-244. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.10.031 http://www.tcsae.org

0 引 言

随着风力发电技术的发展, 超大型风电机组的发电容量迅速扩大, 意味着更高的塔架设计和更长的叶片设计。叶片的加长, 使得扫风面积增大, 尾流区也随之增大; 同时, 塔架的增高, 使得尾流效应的性质更加复杂。已有研究表明, 对于大型风电机组, 尾流效应的作用是不能忽视的, 它对风机的承载部件的疲劳载荷的增大有着重要影响, 并且对风电机组输出功率特性也有显著影响^[1-4]。

许多科学家对尾流效应等进行了研究, Alfredsson 等^[5]最早通过风洞试验研究尾流效应, 揭示尾流对风力机出力的影响。Hand 等通过显示试验对风力机叶片近远场尾流结构做出详细分析^[6-7]。风场测试中, 最著名的单台风力机实测是 Tjaereborg、Nibe 和 Sexbieram 测试^[8-9]; 著名的集群实测是 Horns Rev, Nysted, Middle Grunden, Vindeby, EWTW 等测试^[10-11]。他们建立了一些考虑尾流效应的模型, 并且与实际试验风场的实测数据相匹配^[12]。但是, 当时的试验风场的塔架高度较低, 风电机组容量、扫风面积、风电场规模较小, 其尾流效应对机组的影响也比较简单。因此, 现有研究普遍采用的方法都是用单一的“等效设计湍流强度”这个参量来代替所有的尾流效应^[13]。这种传统方法随着风电机组的不断增高增大, 风电场的规模剧增的形势下, 已经越来越失去适用性。

并且, 随着风速差异、受力差异的扩大, 风电机组不同受力部件之间产生的疲劳载荷的响应的差异性也突显出来^[14]。因此, 必须进一步地研究尾流效应对机组的影响。尾流模型是描述风力机尾流结构的数学模型, 用于计算风力机尾流区域的速度分布和风电场中处在尾流区的风力机的功率输出^[15]。现有的对风电机组尾流模拟的研究先后经过了不考虑湍流的一维线性尾流模型、二维轴对称涡旋粘性尾流模型和基于三维 CFD 的尾流模型^[16]。

本文以 Thomsen 等^[17]对尾流的研究为基础, 分别建立 1.5 与 3 MW 风电机组模型, 通过控制变量的方法, 以上下游风电机组间距、上游风电机组推力系数、湍流强度的输入分别作为变量, 在特定疲劳载荷工况下进行模拟计算, 将对下游风电机组各部件载荷数据进行模拟分析, 得到不同尾流参数对下游风电机组载荷的影响。

1 基本理论

1.1 基础尾流定理

风电机组尾迹是扩张的。由质量守恒方程 (1) 以及式 (2), 可得式 (3) 及式 (4)。

$$\pi R_1^2 V_1 = \pi R^2 V_T = \pi R_2^2 V_2 \quad (1)$$

$$\begin{cases} V_T = V_1(1-a) \\ V_2 = V_1(1-2a) \end{cases} \quad (2)$$

$$R = R_1 \sqrt{1-a} \quad (3)$$

$$R_2 = R \sqrt{(1-a)/(1-2a)} \quad (4)$$

式中 R_1 为风轮前某处半径, m; V_1 为风轮前某处来流风速, m/s; R_2 为风轮后某处半径, m; V_2 为风轮后某处风速, m/s; R 为风轮半径, m; V_T 为通过风轮的速度,

收稿日期: 2016-09-28 修订日期: 2017-04-13

基金项目: 国际合作重大专项 (2016YFE0102700)

作者简介: 邓 英, 女, 湖南, 教授, 主要从事风力发电的技术研究。北京华北电力大学可再生能源学院, 102206。Email: Dengying25@163.com

m/s; a 为轴向诱导因子。

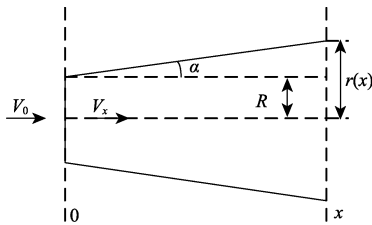
在最大功率情况下 $a=1/3$, 有 $R=1.225R_1$ 、 $R_2=1.414R=1.732R_1$ ^[18]。

$$\begin{cases} V_x = (1-a)V_0 \\ A_w = \beta A \\ \Delta A_n = A\beta \tan \gamma \end{cases} \quad (5)$$

式中 V_x 表示尾流区域风速, m/s; V_0 表示自然来流风速, m/s; A 表示上游风电机组风轮扫掠面积, m^2 ; A_w 表示尾流区域的面积, m^2 ; ΔA_n 表示距离上游风电机组 n 倍直径截面处面积的增长量, m^2 ; γ 表示面积扩张角, ($^\circ$); β 为扩张系数^[19]。扩张系数与轴向诱导因子关系如式 (6)。

$$\beta = \left(1 - \frac{1}{2}a\right) / (1-a) \quad (6)$$

另一种圆锥理想尾流假设为: 自然风通过上游风电机组向下游传播的过程, 可以理想为圆锥形, 如图 1 所示。上游风电机组安装在 $x=0$ 处, $r(x)=R+xk$, 其中 $k=\tan\alpha$ 为尾流下降系数。



注: V_0 表示自然风速, $m \cdot s^{-1}$; V_x 表示尾流区域风速, $m \cdot s^{-1}$; R 表示风轮半径, m; α 为圆锥的顶点角度, ($^\circ$); x 表示 2 个风电机组之间的距离, m; $r(x)$ 表示尾流区域圆锥体的投影半径, m。
Note: V_0 represents natural wind speed, $m \cdot s^{-1}$; V_x represents wind speed in the wake region, $m \cdot s^{-1}$; R represents wind radius, m; α represents vertex angle of the cone, ($^\circ$); x represents distance between two wind turbines, m; $r(x)$ represents projection radius of wake cone, m.

图 1 圆锥理想尾流假设
Fig.1 Ideal conical wake hypothesis

1.2 风电机组的 Jensen 尾流模型

影响尾流效应的主要物理因素为机组间距、上游风电机组功率特性及其推力特性和尾流区域的湍流强度^[20]。尾流区域的湍流强度为:

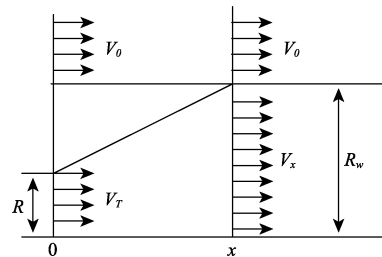
$$\sigma/V_a = (\sigma_G + \sigma_0)/V_a \quad (7)$$

式中 V_a 表示平均风速, m/s; σ_G 表示风电机组产生湍流的均方差; σ_0 表示自然湍流的均方差。一般情况下, $\sigma_0=0.08V_a$, $\sigma_G=0.12V_a$ 。

工程上用风资源分析软件进行风场设计, WASP 软件使用 Jensen 尾流模型^[21]和 Fuga 尾流模型^[22]。风电场微观选址软件 Wind Farmer 采用涡粘性尾流模型^[23]。在这些尾流模型中, Jensen 尾流模型因其形式简单、易于编码、计算效率高、应用方便且具有一定的精度, 在风电工程领域得到了广泛的应用。Barthelmie 等^[24]将 Jensen 尾流模型和其他 5 个工程模型应用于海上风电场的发电量评估中, 并将结果与现场试验数据进行对比分析。此外, Barthelmie 等^[25]经过一系列的数值试验指出, 工程模型的计算结果与较为先进的 CFD 方法的结果相差不大。这些研究表明虽然 Jensen 模型为形式简单的解析模型, 但它能够较好

地预测风力机的尾流流场分布特征, 特别是能够较好地评估风电场的发电量。

Jensen 模型基于下列 3 个假设: 1) 尾流场横截面初始直径为风轮直径; 2) 尾流场横截面半径增长速率呈线性关系; 3) 尾流场横向剖面上的速度是均匀的。Jensen 模型较好的模拟了平坦地形条件下的尾流情况^[26], 模型简化图如图 2。



注: R_w 表示尾流半径, m; V_T 表示通过风轮的风速, $m \cdot s^{-1}$ 。
Note: R_w represents wake radius, m; V_T represents wind speed passing through the wind rotor, $m \cdot s^{-1}$.

图 2 Jensen 模型
Fig.2 Jensen model

可以根据动量理论对尾流区域物理量进行分析能得出:

$$\rho\pi R_w^2 V_x = \rho\pi R^2 V_T + \rho\pi(R_w^2 - R^2)V_0 \quad (8)$$

$$\frac{dR_w}{dt} = k_w(\sigma_0 + \sigma_G) \quad (9)$$

$$\frac{dR_w}{dx} = \frac{dR_w}{dt} \frac{dt}{dx} = k_w(\sigma_0 + \sigma_G)/V_a \quad (10)$$

式中 ρ 为空气密度, 一般取 1.225 g/L ; k_w 为一个常数; R_w 表示尾流半径, m。令 k 为尾流下降系数, 则有 $k=k_w(\sigma_0 + \sigma_G)/V_a$, 根据贝茨理论^[27]对轴向推力进行计算可求得自然风速、通过风速和推力系数之间的关系。

$$V_T = V_0(1 - C_T)^{1/2} \quad (11)$$

由方程式 (8) ~ (11) 联立可求得表达式:

$$V_x = V_0 \left\{ 1 - \left[1 - (1 - C_T)^{1/2} \right] \left[\frac{R}{R + kx} \right]^2 \right\} \quad (12)$$

由方程式 (11) 可以得到在不同自然风速下通过风速于推力系数的变化曲线, 如图 3a 所示。在不同推力系数下通过风速与自然风速的变化曲线, 如图 3b 所示。

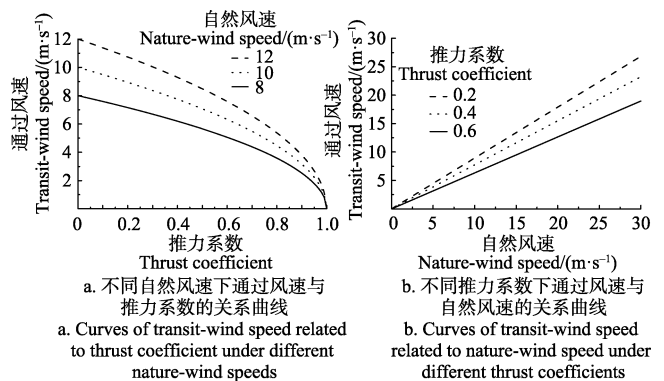


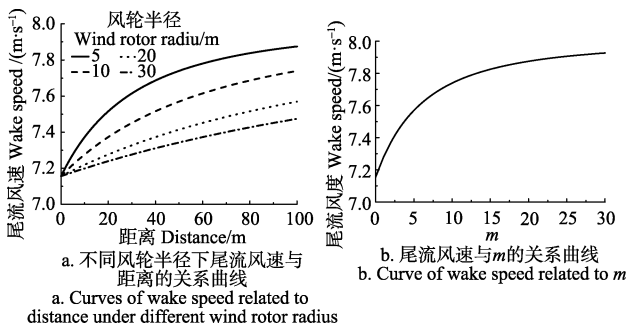
图 3 自然风速和推力系数与通过风速之间的关系曲线
Fig.3 Curve of transit-wind speed related to different nature-wind speeds and thrust coefficients

图 3a 中的从上到下分别对应自然风速为 12、10 和 8 m/s 时, V_T 关于 C_T 的变化规律曲线。由图 3a 可知, 在自然风速一定的情况下, 随着推力系数的增大, 风轮处风速会非线性减小, 如果推力系数 C_T 能足够大, 那么经过风轮的风速 V_T 将会趋于 0。不过实际的机组运行中, 并不会出现推力系数大于等于 1 的现象。

由方程式 (11) 还能得到另一结论: 在推力系数 C_T 一定的情况下, V_T 将随 V_0 线性变化, 规律如图 3b 所示。图 3b 中的 3 条曲线由上至下分别对应推力系数 $C_T=0.2$ 、0.4、0.6 时, 经过风轮的风速 V_T 随自然风速 V_0 变化过程线, 从图 3b 中都能看出, V_T 随 V_0 线性增大, 随着推力系数 C_T 的增大, 风轮处的风速 V_T 将逐渐减小, 结论与图 3a 所得完全一致。Jensen 尾流模型认为来流风速通过风电机组后, 在向下游传播的过程中, 尾流的膨胀与速度的损失与尾流的传输距离成线性关系。

从式 (12) 中又可知, 当尾流下降系数 k 一定时, 尾流方向 x 处的尾流风速 V_x 是关于风轮半径 R 和距离 x 的函数。并且, 根据风特性的不同, 下降系数 k 的取值也有所不同: 若上游风电机组接收的流动是自然风, 尾流下降系数 k 就取 0.04, 否则, k 取 0.08^[28]。

如果尾流下降系数 k 取 0.08, 自然风速 V_0 为 8 m/s, 推力系数 C_T 等于 0.2, 那么尾流风速 V_x 随距离 x 的变化规律将如图 4a 所示。从图 4a 可知, 尾流的风速 V_x 随距离 x 的增加而增加, 但增加的趋势较平缓。而对于不同的风轮半径 R , 其值越大, 曲线越接近线性变化, 也越平缓。



注: 尾流下降系数 k 取 0.08, 自然风速 V_0 为 $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, 推力系数 C_T 等于 0.2, $m=x/R$ 。
Note: The wake drop factor k is 0.08, the natural wind speed V_0 is $8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, and the thrust coefficient is equal to 0.2, $m=x/R$.

图 4 尾流风速与距离和 m 的关系曲线

Fig.4 Curves of wake speed related to distance and m

设 $m=x/R$, 将 m 带入式 (12) 可得式 (13)。

$$V_x = V_0 \left\{ 1 - \left[1 - (1 - C_T)^{1/2} \right] \left(\frac{1}{1 + km} \right)^2 \right\} \quad (13)$$

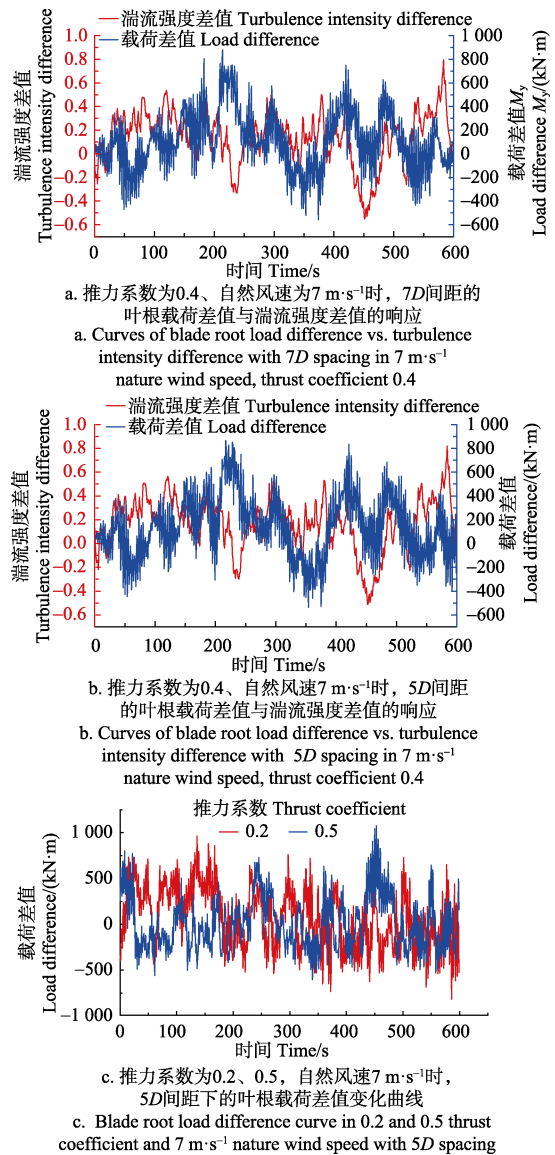
若对于尾流下降系数、自然风速和推力系数的假设不变, 则尾流风速 V_x 随 m 的变化规律如图 4b 所示。由图 4b 可知, 尾流风速 V_x 随 m 的增大而增大, 且趋势越来越平缓。

2 风电机组尾流对下游风电机组载荷影响的仿真分析

2.1 湍流强度、推力系数与动态载荷的关系

风湍流是造成风电机组各部件疲劳损伤、可靠性降

低和发电出力特性差的主要原因之一^[27]。传统的解决风电机组尾流中湍流强度的方法是只通过设计湍流强度风来取代尾流效应, 同时考虑上风向尾流模型尺度参数^[28]。上游风电机组产生的风场尾流参数的变化和性质由许多参量共同决定。主要是前后风电机组的间距、上游风机的推力系数和湍流强度对载荷的影响, 它们之间的关系如图 5 所示。



注: D 为风轮直径, m 。
Note: D is diameter of wind rotor, m .

图 5 不同因素对叶根载荷的影响
Fig.5 Effects of different factors on blade root loads

湍流强度是描述大气湍流运动特性的重要的特征量, 是湍流总体水平的度量, 主要用来描述风速随时间变化的程度^[29]。风力发电机组承受气动载荷的主要部位是叶片和塔筒, 叶片与塔筒所受风载都以弯矩和推力的形式直接作用于风电机组上^[30]。图 5 中的差值为未受尾流影响时的数值与加入尾流影响后的数值之差。图 5a 为推力系数为 0.4、风速为 7 m/s 时, 7D 间距的叶根载荷差值与湍流强度差值的响应曲线, 图中湍流强度的变化对载荷影响明显, 图 5b 显示 5D 间距的湍流强度和载荷变

化量的变化趋势与图 5a 相同，并且相比 7D 间距的载荷偏大。图 5c 所示的推力系数为 0.2、0.5 时，5D 间距下的叶根载荷差值变化曲线表明，推力系数为 0.5 的载荷比推力系数为 0.2 的载荷变化大，经统计计算增量 9.3%，说明推力系数影响载荷，推力系数越大载荷越大。

总结上述仿真研究可知，上游风力机推力系数、风电机组间距、湍流强度都对下游风电机组的运行有很明显的影响。

为了进一步研究上游风力机推力系数、机组间距、风速（为标准湍流风）的尾流影响，假设实际风电场小范围风电机组布机的种类一般是同种风力机，同时假设上游风电机组风能利用率较高，叶尖速比可设为 8；采用 Bladed 风电机组建模仿真软件，分别按照 FL1500/70 和 FL3000/90 双馈式兆瓦风电机组的参数，进行风场环境条件、风湍流模型、风电机组参数的设定。

2.2 不同推力系数对下游风电机组主频载荷幅值的影响

对上游风电机组推力系数进行假设。假设推力系数为 0 时，上游 3.0 MW 风电机组处于停机状态，对下游风电机组无尾流影响。推力系数取值分别为 0、0.4、0.55、0.7、0.85，得到叶根摆振弯矩 M_x 和叶根扭转弯矩 M_z 主频（主频为 0.3 Hz 附近）幅值关于推力系数的变化，如图 6 所示。

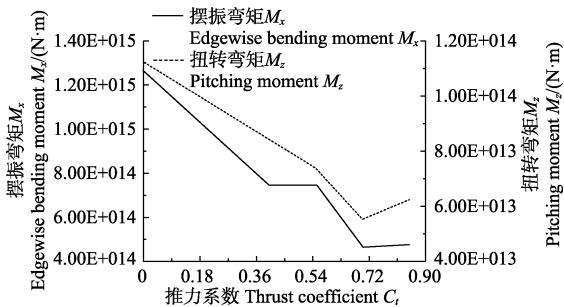


图 6 叶根摆振弯矩与叶根扭转弯矩主频幅值随推力系数变化
Fig.6 Dominant frequency amplitude of edgewise bending moment of root and pitching moment of root relate to thrust coefficient

随着推力系数的增加， M_x 、 M_z 的趋势均为下降。主要原因是来流风速下降从而影响 M_z ，驱动转矩下降使 M_x 下降， M_x 为风电机组提供转矩，直接影响风电机组的发电量。但在推力系数为 0.7 之后， M_z 有明显增大，可见水平方向有较大风速，而 M_x 并未明显增大，可判断此时为湍流强度增大造成 M_z 增大。因此，在上游机组推力系数大于 0.7 后，尾流效应明显，下游机组的疲劳损伤会增加。

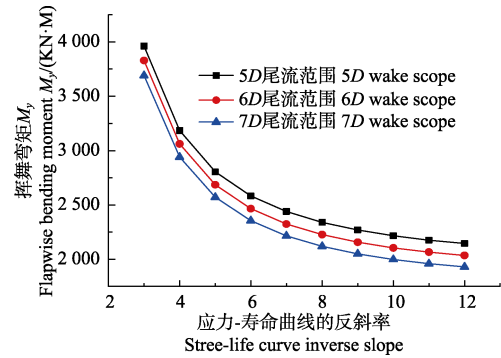
2.3 尾流对下游风电机组载荷的影响

假设 1.5 MW 双馈式风电机组间距为 5、6、7 倍风轮直径，为了得到下游风电机组的叶片根部等效疲劳载荷的响应，本案例进行了 1.1 工况下风电机组疲劳载荷的仿真计算，假设推力系数为 0.4，得到 5D、6D、7D 尾流间距的载荷曲线如图 7 所示。

应力-寿命曲线的反斜率与材料有关，在风电机组中，金属材料反斜率值较小，通常取 4；叶片反斜率值较大，

通常取 10^[31]。由图 7 可知，上游风电机组间距的变化影响等效疲劳载荷，尾流间距越大等效疲劳载荷越小。

当上游机组的间距为 5D 时，通过变桨控制使上游风电机组推力系数分别为 0.5、0.6、0.8，得到下游风电机组的叶根摆振弯矩 M_x 的等效疲劳载荷与风速的关系曲线，如图 8 所示。



注：推力系数为 0.4。
Note: Thrust coefficient is 0.4.

图 7 不同机组间距下叶根摆振弯矩与应力-寿命曲线反斜率的关系曲线

Fig.7 Curves of flapwise bending moment of root related to Stress-Life curve inverse slope under different distances between wind turbines

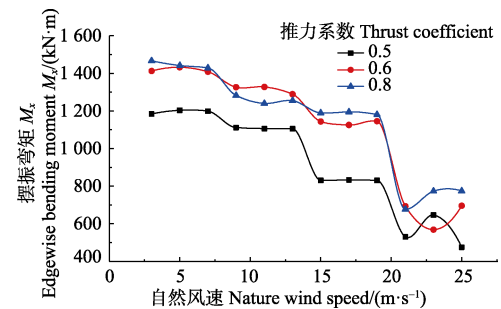


图 8 机组间距为 5D 时不同风轮推力系数下的叶根摆振弯矩与自然风速的关系曲线

Fig.8 Curves of edgewise bending moment of root related to nature wind speed under different thrust coefficients when distance between wind turbines equals 5D

图 8 表明，随自然风速增大 M_x 载荷下降；随着推力系数减小，叶根摆振弯矩 M_x 的变小，推力系数为 0.5 时，疲劳载荷最小。因为独立变桨距控制可有效减小由于风速沿高度分布不均匀造成的气动轴向力的周期性变化，减轻桨叶的气动疲劳载荷^[32]，所以在风速大于额定风速 12 m/s 以后， M_x 减小幅度增大主要是因为变桨控制让推力系数变小，使下游风电机组的风湍流强度增加，波动载荷降低。

因此，可以认为兆瓦级风电机组承受尾流效应，无论是风轮间距变小，还是推力系数增加，都是疲劳载荷增加，风湍流强度变小。

3 结论与讨论

文章讨论了上游风电机组风轮间距、推力系数、来流风速与下游机组风湍流强度、疲劳载荷的关系，利用

Bladed 软件和 Matlab 幅频程序对机组运行仿真数据进行分析, 判断尾流效应对下风向风电机组载荷的影响, 得到如下结论:

1) 在自然风速一定的情况下, 随着推力系数的增大, 通过风速会非线性减小。尾流的风速随两风机间的距离的增加而增加, 但增加的趋势是逐渐平缓的。而对于不同的风轮半径, 其值越大, 尾流风速-距离的关系曲线越接近线性变化, 也越平缓。

2) 风电机组处于尾流影响范围内时, 在风速和推力系数相同的条件下, 间距越远载荷受尾流的影响越小。在湍流强度差值的绝对值较大的情况下, 载荷差值随湍流强度差值的减小而增大, 是因为受尾流影响后湍流强度减小使载荷增大; 载荷的差值随湍流强度的差值的增大而减小, 即受尾流影响后湍流增大同时载荷减小, 是因为虽然湍流增大时载荷增大但与此同时受尾流影响作用后风速变小使推力系数减小, 随之载荷减小, 相较而言推力系数减小对载荷的影响更大。

3) 当上风向风电机组的推力系数增大, 载荷增加, 当风速大于额定风速时, 应采用变桨控制减小推力系数, 以减小风电机组的疲劳损伤。

以 Bladed 软件的风电机组建模及数值仿真计算为依据, 讨论上游风电机组尾流对风电机组的疲劳载荷影响, 有一定的局限性, 需进一步提高数据的准确性。

[参 考 文 献]

- [1] 杨培宏, 胡庆林, 付盼, 等. 考虑风速、风向变化及尾流效应的风电场建模[J]. 可再生能源, 2016, 34(5): 692—698.
Yang Peihong, Hu Qinglin, Fu Pan, et al. The modeling of wind farm considering the changes of wind speed, wind direction and wake effect[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(5): 692—698. (in Chinese with English abstract)
- [2] Vera-Tudela L, Kuhn M. Analysing wind turbine fatigue load prediction: The impact of wind farm flow conditions[J]. Renewable Energy, 2017, 107: 352—360.
- [3] Orlando S, Bale A, Johnson D A. Experimental study of the effect of tower shadow on anemometer readings[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, 99(1): 1—6.
- [4] 李勇锋. 兆瓦级风电机组的载荷计算与性能研究[J]. 中国新技术新产品, 2017(10): 48—49.
- [5] Alfreðsson P H, Dahlberg J A. Measurements of wake interaction effects on power output from small wind turbine models[R]. Stockholm: FFA, 1981.
- [6] Hand M, Simms D, Fingersh L. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns[R]. Battelle: NREL, 2001.
- [7] 胡丹梅. 水平轴风力机尾迹气动特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.
Hu Danmei. Study on horizontal-Axis Wind Turbine Wake Aerodynamics[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006. (in Chinese with English abstract)
- [8] Oye S. Tjaereborg wind turbine: first dynamic inflow measurements[R]. Copenhagen: Technical University of Denmark, 1991.
- [9] Cleijne J W. Results of Sexbierum wind farm: single wake measurements[R]. Rotterdam: TNO Institute of Environmental and Energy Technology, 1993.
- [10] Ivanell S, Sørensen J N, Dan H. Numerical Computations of Wind Turbine Wakes[M]. Berlin: Springer Berlin Heidelberg, 2007: 259—263.
- [11] Frandsen S, Barthelmie R, Rathmann O. Summary report: The shadow effect of large wind farms: Measurements, data analysis and modeling[R]. Roskilde: Ris0, 2007.
- [12] Wang T, Coton F N. A high resolution tower shadow model for downwind wind turbines[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2001, 89(10): 873—892.
- [13] Fadaeinedjad R, Moschopoulos G, Moallem M. The impact of tower shadow, yaw error, and wind shears on power quality in a wind-diesel system[J]. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2009, 24(1): 102—111.
- [14] 张晓东, 张镇. 半经验风力机尾流模型的研究[J]. 太阳能学报, 2014(1): 101—105.
Zhang Xiaodong, Zhang Zhen. Research of semi-empirical wind turbine wake model[J]. Acta Energetica Sinica, 2014(1): 101—105. (in Chinese with English abstract)
- [15] 白鹤. 海上风电机组的尾流模型研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
Bai He. Research on Wake Model of Wind Turbines in Offshore Wind Farm[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [16] 唐田. 大型风电场风电机组尾流模型及其应用研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2015.
Tang Tian. Research in Wake Model on the Large-scale Wind Farm and its Application[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [17] Thomsen K, Sørensen P. Fatigue loads for wind turbines operating in wakes[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1999, 80(1/2): 121—136.
- [18] 曹娜, 于群, 王伟胜, 等. 风电场尾流效应模型研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(1): 222—229.
Cao Na, Yu Qun, Wang Weisheng, et al. Research on wake effect model on wind farm[J]. Acta Energetica Sinica, 2016, 37(1): 222—229. (in Chinese with English abstract)
- [19] 李少华, 岳巍澎, 匡青峰, 等. 双机组风力机尾流互扰及阵列的数值模拟[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(5): 101—107.
Li Shaohua, Yue Weipeng, Kuang Qingfeng, et al. Numerical simulation of wake interaction and array of double wind turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(5): 101—107. (in Chinese with English abstract)
- [20] 王苏, 周健. 考虑尾流效应的风电场可靠性模型研究[J]. 黑龙江电力, 2015, 37(3): 211—215.
Wang Su, Zhou Jian. Research on reliability model of wind farm considering wake effect[J]. Heilongjiang Electric Power, 2015, 37(3): 211—215. (in Chinese with English abstract)
- [21] Jensen N O. A note on wind generator interaction. Roskilde[R]. Denmark: RisØ National Laboratory, 1983.
- [22] Ott S. Linearised CFD models for wakes. Danmarks Tekniske Universitet[R]. Denmark: RjsØ National Laboratoriet for Baeredygtig Energi, 2011.
- [23] Schlez W, Tindal A, Quarton D. GH wind farmer validation report[R]. Bristol: Garrad, 2003.
- [24] Barthelmie R J, Frandsen S T, Nielsen M N, et al. Modelling and measurements of power losses and turbulence intensity in wind turbine wakes at Middelgrunden offshore wind farm[J]. Wind Energy, 2010, 10(6): 517—528.
- [25] Barthelmie R J, Folkerts L, Larsen G C, et al. Comparison of wake model simulations with offshore wind turbine wake profiles measured by sodar[J]. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology, 2006, 23(7): 888—901.
- [26] Tian L L, Zhu W J, Shen W Z, et al. Prediction of multi-wake problems using an improved Jensen wake model[J]. Renewable Energy, 2017, 102: 457—469.
- [27] 邓英, 周峰, 陈忠雷, 等. 基于 LPV 增益调度的风电机组

- 控制验证与仿真分析[J]. 农业工程学报, 2016, 32(3): 29—33.
- Deng Ying, Zhou Feng, Chen Zhonglei, et al. Verification and simulation analysis of wind turbine control based on linear parameter varying gain scheduling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(3): 29—33. (in Chinese with English abstract)
- [28] 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—2400.
- 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—2400. (in Chinese with English abstract)
- [29] 马瑞洁. 水平轴风力机的尾流特性研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2016.
- Ma Ruijie. Study of Horizontal-Axis Wind Turbine Wake Characteristics[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [30] 付德义, 薛扬, 焦渤, 等. 湍流强度对风电机组疲劳等效载荷的影响[J]. 华北电力大学学报, 2015, 42(1): 45—50.
- Fu Deyi, Xue Yang, Jiao Bo, et al. Effect on the turbulence intensity to wind turbine fatigue equivalent load[J]. Journal of North China Electric Power University, 2015, 42(1): 45—50. (in Chinese with English abstract)
- [31] 江兵. MW级直驱风力发电机叶片载荷分析及疲劳寿命估算[D]. 太原: 太原理工大学, 2015.
- Jiang Bing. Bladed Load Analysis and Fatigue Life Estimation of MW Grade Direct Driven Wind Turbine[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015. (in Chinese with English abstract)
- [32] 邢钢, 郭威. 风力发电机组变桨距控制方法研究[J]. 农业工程学报, 2008, 24(5): 181—186.
- Xing Gang, Guo Wei. Method for collective pitch control of wind turbine generator system[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(5): 181—186. (in Chinese with English abstract)

Analysis on relationship between wake and fatigue load of wind turbines

Deng Ying, Li Jianan, Liu Hesheng, Pang Huiqing, Tian De

(Renewable Energy Institute, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: With the continuous development of wind power industry, the power record of single wind turbine is constantly expanded, and the scale of wind power generation is becoming larger and larger. For large wind turbines, the wake effect cannot be ignored. It has an important influence on the fatigue load of the wind turbine, and also has a significant impact on the output power characteristics of the wind turbine. In order to study the influence of wind turbine wake on the load of the downstream wind turbine, several important wake parameters such as upstream and downstream wind turbine spacing, upstream wind turbine thrust coefficient and nature wind speed are assumed according to the theoretical results of some researchers. The physical quantity of wake region can be obtained according to the momentum theory. The relation between the natural wind speed, the wind speed and the thrust coefficient can be obtained by calculating the axial thrust based on the Bates' theory. The wind speed increases linearly with the natural wind speed, but with the increase of the thrust coefficient, the wind speed of the wind rotor will gradually decrease. When the natural wind speed is fixed, with the increase of thrust coefficient, the wind speed of the wind turbine will be reduced, and if the thrust coefficient can be large enough, then the wind speed of the wind rotor will tend to 0. However, there will be no thrust coefficient greater than or equal to 1 in the actual operation of the wind turbine. Use GH Bladed software to build a model of FL1500/70 1.5 and 3.0 MW doubly-fed wind turbine, and calculate the load response of the wake model to the downstream wind turbine. The conclusions are obtained by analyzing the calculation results which are as follows: 1) When the natural wind speed is constant, the wind speed at the wind rotor will decrease nonlinearly with the increase of thrust coefficient. The wake wind speed increases with the distance between 2 wind turbines, but the trend is gradually stabilized. But for different wind rotor radius, the larger the value, the closer to linear variation the relationship curve of wake wind speed and distance. 2) When the wind turbine is in the influence range of the wake, under the same wind speed and thrust coefficient, the farther the distance, the less the load will be affected by wake. In the case of larger absolute value of turbulence intensity difference, the load difference increases with the decrease of turbulence intensity difference, which is due to that the decrease of turbulence intensity under the wake effects makes the load increase; sometimes the load difference decreases with the increase of the difference of turbulence intensity, which means under the wake effect the turbulence increases and at the same time the load is reduced. The reason is when the turbulence increases, the load increases, but at the same time the wind speed affected by the wake effect becomes smaller, so the thrust coefficient decreases, followed by the decrease of the load. Comparing the turbulence intensity with the thrust coefficient, the reduction of thrust coefficient has a more influence on the load. 3) When the thrust coefficient of the upstream wind turbine increases, the load will increase; when the wind speed is greater than the rated wind speed, the thrust coefficient should be reduced by adopting the pitch control so as to reduce the fatigue damage of the wind turbine. 4) Based on the wind turbine modeling and numerical simulation calculation with Bladed software, the influence of upstream wind turbine wake on the fatigue loading of the wind turbine is discussed. The accuracy of this calculation which is used to determine the load response characteristics of wind turbines is limited, but it is very difficult to carry out on-site verification of the fatigue load data of wind turbine. Therefore, the data provided by the chart in this paper are for reference only.

Keywords: wind turbines; computer simulation; models; distance; thrust coefficient; wind speed; wake; fatigue load