

不同风剪切特性下的尾流分布

李泽鹏, 张福国, 周川, 吴鹏, 李晓恩
(国家电投集团科学技术研究院有限公司, 北京 102209)

摘要: 针对风剪切对尾流的影响研究不充分的问题, 文章在某风电场进行了风场实验, 分析了不同风速下的风剪切现象以及在不同来流条件下的尾流变化特征, 并使用了三维尾流模型对垂直尾流剖面进行了验证。结果表明: 风速大小对风剪切的影响较为明显, 风剪切效应随着风速的增加而加强, 风速每增加 1 m/s, 风剪切指数增加 0.05; 风剪切效应对尾流的分布有较大影响, 风剪切效应越强, 尾流的速度沿着高度方向上的梯度越大, 尾流的宽度和长度也越大; 在轮毂中心线附近的模型预测曲线和尾流实测数据拟合较好, 相对误差基本在 10% 以内, 受地形的影响, 近地侧预测的相对误差较大。

关键词: 风场实验; 风剪切; 尾流; 激光雷达

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2024)03-0355-06

0 引言

随着化石能源的日渐枯竭, 可再生能源的利用逐渐受到各国重视。风能开发潜力巨大^[1], 但尾流的存在会降低风力机的发电量并增加风力机的疲劳载荷, 严重威胁风力机的安全运行, 因此, 风力机尾流是影响风能利用的重要因素之一^[2]。

风剪切效应对尾流分布有较大影响, 特别是在垂直方向, 研究风剪切对尾流特性的影响能够改进尾流模型以及更精准高效地预测风电场的运行状况^[3]。风场实验是研究尾流分布最直接、有效的方法之一^[4]。赵飞^[5]通过激光雷达测风实验对尾流在垂直剖面的分布进行了分析。韩星星^[6]通过风场实验研究了大气稳定度对山地风力机功率的影响。

风场实验适合于定性分析, 而定量分析则需要数值模拟或者解析模型。数值模拟具有较高的计算精度, 许多学者通过数值模拟的方法对风剪切效应下的尾流分布进行了研究。王胜军^[7]通过 CFD 软件构建了致动线模型, 并计算了风剪切入流况下风力机的气动和尾流特性。董彦斌^[8]采用人工合成湍流入口边界耦合大涡模拟的方法对 Bolund 岛风场流动开展数值模拟, 研究了复杂地形的流场特性以及山地地形中风力机的尾流特征。杨瑞^[9]研究了风剪切效应对风力机叶片结构特性的影响。也有学者为了以较小的计算成本

准确预测风力机的尾流分布, 提出了多种考虑风剪切的三维解析尾流模型。文献[10-12]将风剪切拟合为指数函数形式, 从而提出了三维解析尾流模型, 并对尾流分布进行了验证。上述针对风剪切对尾流影响的研究均只是在单一风剪切条件下进行的, 而在实际的风电场中, 风速是不断变化的, 这会影响风速在垂直方向上的分布, 进而影响尾流的变化, 所以对于不同风剪切来流条件下的尾流分布不容忽视。

本文利用两台高精度激光雷达在河北某风电场进行了风场实验。首先, 分析了不同风速下的风剪切变化特征; 然后, 分析了不同来流条件下的尾流的垂直剖面分布; 最后, 利用三维尾流模型验证了尾流的垂直剖面分布, 并进行了相对误差分析。

1 实验概况

1.1 实验装置

实验使用了两台多普勒激光雷达, 型号分别为 Wind Mast WP350 和 Wind3D 6000。Wind Mast WP350 的 DBS 模式(垂直向上扫描)可连续不间断地探测激光雷达上方 20~350 m 处任意 30 个高度的风速风向廓线, 测量误差在 0.1 m/s 以内。Wind3D 6000 为三维扫描型激光雷达, 该雷达基于光学脉冲相干多普勒频移检测原理, 可实现中下层对流层(包括大气边界层)三维风场的精细

收稿日期: 2022-10-18。

基金项目: 智慧园区架构模型研究及能量管理平台研发项目(C-SZH-202103)。

作者简介: 李泽鹏(1982-), 男, 高级工程师, 主要从事能源系统设计和能源领域人工智能技术应用等工作。E-mail: lizepeng@spic.com.cn

化探测,探测半径最大可达 6 km,并且具备多种扫描模式,其中,PPI 模式可测量风场的水平剖面分布,RHI 模式可测量风场的垂直剖面分布,测量误差均不超过 0.1 m/s。两种型号激光雷达的具体参数如表 1 所示。

表 1 两种激光雷达的参数

Table 1 Parameters of two kinds of lidars

参数	Wind Mast WP350	Wind3D 6000
激光波长/ μm	1.5	1.5
探测范围/m	20~350	45~6 000
空间分辨率/m	1	15/30/用户设定
数据刷新时间/s	1~600	0.1~1
风速测量范围/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	0~75	-37.5~37.5
风速测量精度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	≤ 0.1	≤ 0.1
测量模式	DBS	PPI/RHI

1.2 实验风场以及仪器布置

实验在某陆上风电场进行,该风电场共有 50 台风电机组,在该风电场的东北角有 4 台风力机(从左至右分别为 1 号、2 号、3 号、4 号)。该风电场的东北角地形较为复杂,具有较高的研究价值,所以实验以这 4 台风力机作为研究对象。4 台风力机均为联合动力公司生产的 UP77 型号,该类型的风力机参数如表 2 所示。

表 2 UP77 型号风力机参数

Table 2 Parameters of UP77 wind turbine

参数	数值
额定功率/kW	1 500
叶轮直径/m	77.36
切入风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3
额定风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	11.1
切出风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	25

为了确定仪器放置的最佳位置,对该风电场 3 年的测风塔数据进行了分析,发现该风电场的主风向为西北方向,因此在实验中将 Wind Mast WP350 布置在了 2 号风力机的西北方向,距离 2 号风力机大概 $2D$ (D 为风力机直径)。而 Wind3D 6000 布置在 2 号风力机的东南方向,距离 2 号风力机大概 $17D$ 。实验仪器的布置如图 1 所示。

2 风剪切效应

由于边界层的气压梯度力、地表摩擦作用、科氏力等因素,导致边界层的风速具有明显的垂直梯度(风剪切效应)^[3],这对垂直方向上的尾流分布有较大的影响。为了研究不同风速大小的风剪切特征,将 Wind Mast WP350 测量的在轮毂高

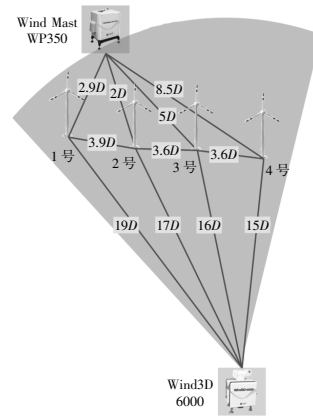


图 1 实验仪器布置

Fig.1 Layout of experimental instruments

度处风速分别为 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16 m/s 各两个时刻的来流风剖面进行对比,如图 2 所示。

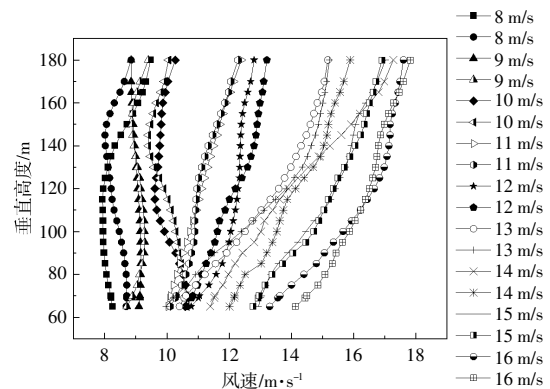


图 2 不同风速下的风剖面特征

Fig.2 Wind profiles characteristics under different wind speeds

由图 2 可知:随着风速的增加,风剪切现象变得更明显;当风速为 8~10 m/s 时,垂直方向上的风速变化并不是很大,其风速分布近似一条垂线;当风速为 11~16 m/s 时,风剪切现象随着风速的增加越来越明显,风速在垂直方向上的梯度越来越大,对应的风剪切指数也越大,且风速每增加 1 m/s,风剪切指数约增加 0.05。

3 尾流分布特征

为了体现不同来流风剖面对尾流分布的影响,本文选择 Wind3D 6000 测量的 2 号风力机在 6 种不同来流条件下所产生的尾流风速图进行了比较,如图 3 所示。

由图 3 可知,随着来流风速的增加,风力机产生的尾流宽度及长度均在逐渐增加,这是由于在小风速情况下,其尾流更容易达到自由流水平,尾流恢复较快,所以尾流长度及宽度均较小。

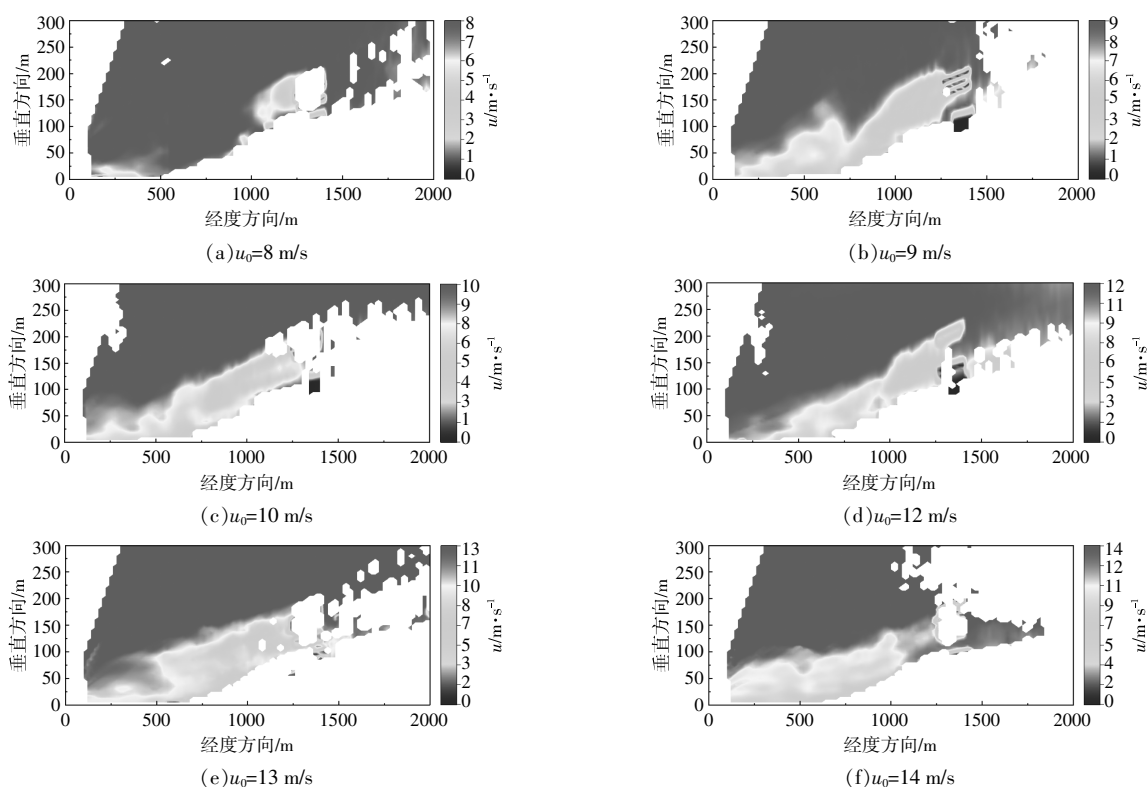


图3 6种不同来流条件下的尾流风速

Fig.3 Figure of wake wind speed under 6 different incoming conditions

图4为6种不同来流条件下的4个下游位置的尾流垂直风剖面。图中,水平轴为尾流速度和来

流风速的无量纲比,垂直轴为垂直距离和风力机直径的无量纲比。

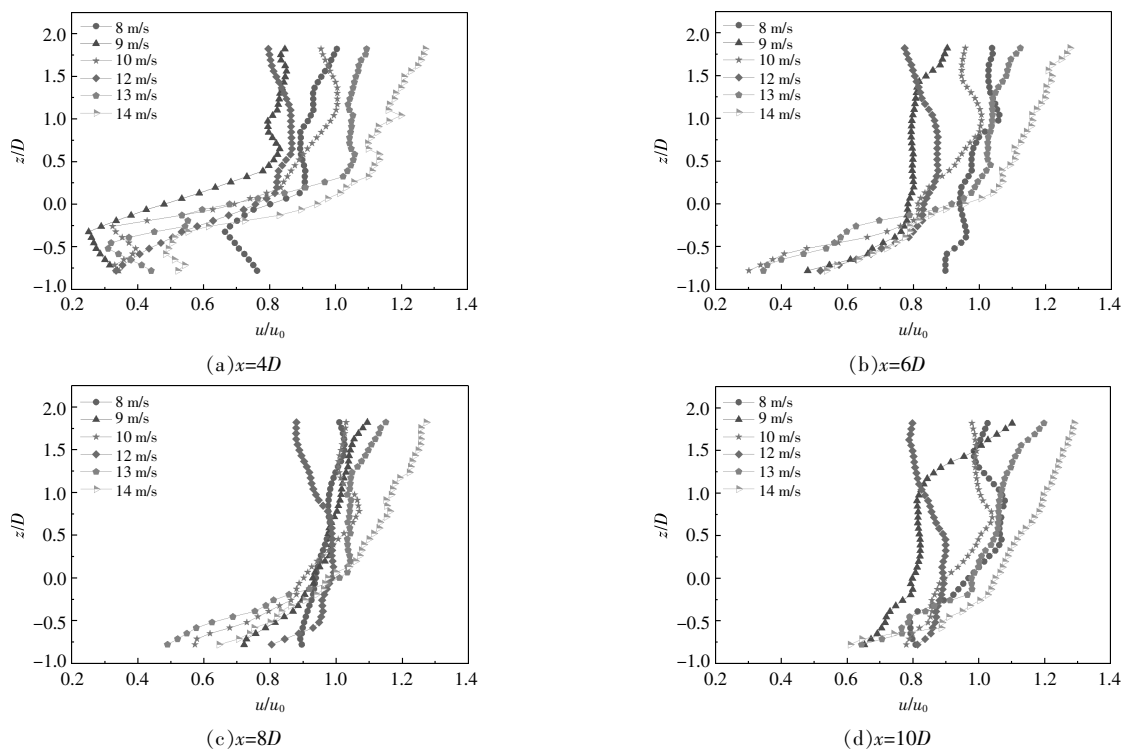


图4 6种不同来流条件下的风力机下游4D, 6D, 8D以及10D处的尾流风剖面

Fig.4 Wake wind profile at 4D, 6D, 8D and 10D downstream of wind turbine under six different inflow conditions

由图 4 可知:随着风速的增加,尾流的风剪切现象变得更明显,这主要是由于自由流的风速越大,其风剪切效应越强,对应的尾流风剖面的风剪切效应也越强;当自由流风速为 9, 10, 11 m/s 时,其尾流亏损较大,而其余的 3 种工况下的尾流亏损较小,这主要是由于目标风力机的额定风速为 11.1 m/s,自由流风速和额定风速越接近,对应的风能利用系数越大,所以尾流亏损越严重;在相同来流的情况下,随着下游距离的增加,尾流速度逐渐增加,这是由于随着下游距离的增加,尾流和自由流之间的相互掺混也越来越强,尾流速度逐渐恢复到自由流的水平。

4 尾流模型验证

本文选择考虑风剪切的三维尾流模型^[11]对风力机下游 8D 处不同来流条件下的尾流剖面进行验证,该三维尾流模型的表达式为

$$u(x, y, z) = u_0 \left[\left(\frac{z+z_{hub}}{z_{hub}} \right)^\alpha - C e^{-\frac{y^2}{2\delta_y^2}} \right] \quad (1)$$

$$C = \frac{4a r_0^2}{\sqrt{2\pi} \delta_z r_z} e^{-\frac{z^2}{2\delta_z^2}} + \frac{a \int_{-r_0}^{r_0} \left[\left(\frac{z+z_{hub}}{z_{hub}} \right)^\alpha - 1 \right] dz}{r_z}$$

式中: u_0 为风力机轮毂中心来流风速; z_{hub} 为风力机轮毂高度; C 为参数; a 为轴向诱导因子; r_0 为初始尾流半径; δ_y 为水平方向上的尾流特征值; δ_z 为垂直方向上的尾流特征值; r_z 为水平方向上的尾流半径; r_z 为垂直方向上的尾流半径; α 为风剪切指数。

图 5 为风力机下游 8D 处的 6 种不同来流条件下的尾流预测剖面和实验数据对比。根据风力机前的自由流条件计算得到风速为 8, 9, 10, 12, 13, 14 m/s 时对应的尾流为 0, 0.05, 0.10, 0.05, 0.15 和 0.20。

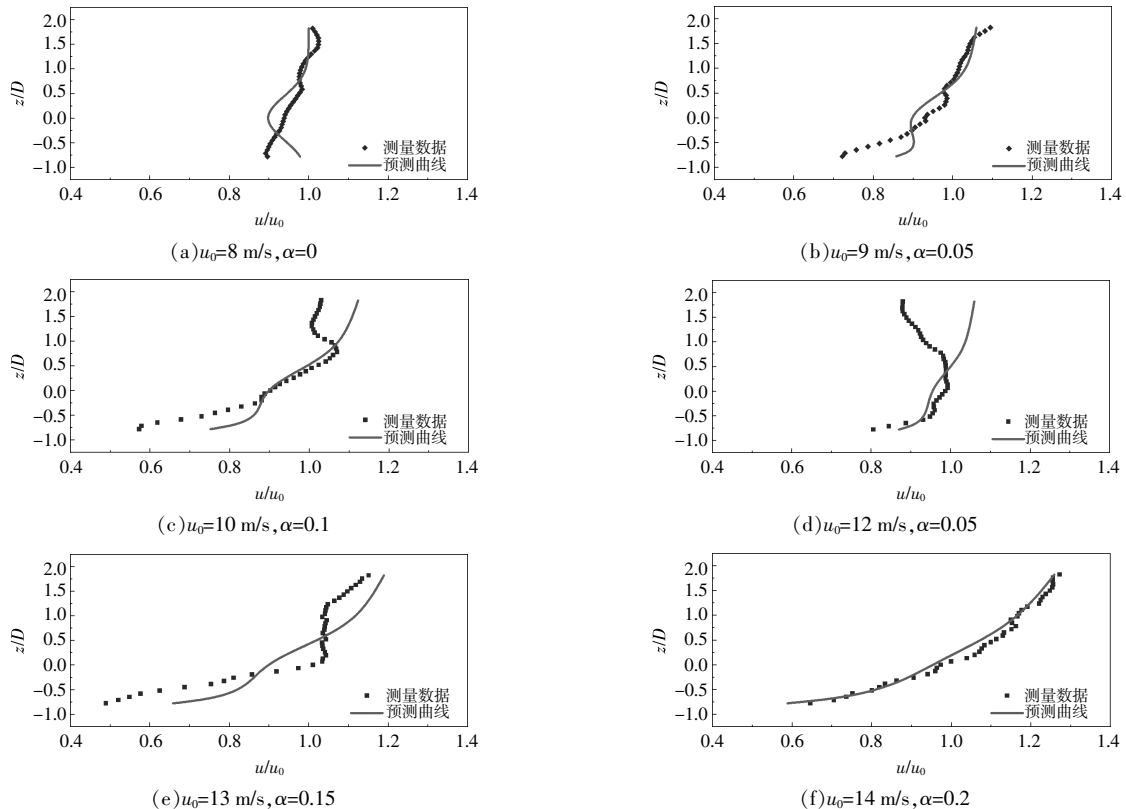


图 5 在风力机下游 8D 处的 6 种不同来流条件下的尾流预测剖面和实验数据对比

Fig.5 Comparison results of wake prediction profile and experimental data under six different inflow conditions at 8D downstream of wind turbine

由图 5 可知,随着风速的增加, α 也在逐渐增大,且随着风速的增大,尾流模型的预测误差减小。在来流风速为 12 m/s 时,对应的 α 只有 0.05,这可能是因为在该时刻目标风力机受到其它风力

机尾流的影响,特别是上半尾流区最容易受到叠加尾流的影响,所以尾流速度偏小,导致其风剪切现象并不是很明显,对应的 α 较小。

为了进一步对预测结果进行分析,本文计算

了预测结果的相对误差,如图6所示。

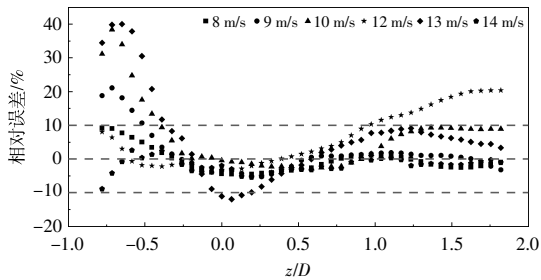


图6 相对误差分析

Fig.6 Relative errors analysis

由图6可知,当来流风速分别为8,9,10,12,13,14 m/s时,预测的最大相对误差分别为9.16%,21.11%,38.41%,20.38%,40.03%和-8.86%,平均相对误差分别为2.86%,3.91%,7.59%,7.53%,10.33%和2.29%。模型预测的相对误差大部分在10%以内,预测精度在可接受范围内,说明不同来流条件下的尾流分布大部分是符合工程尾流模型的。值得注意的是,在轮毂中心线附近的尾流预测的相对误差较小,而在近地侧的预测误差较大,这主要是由于实际风电场的地形并不都是平坦的,而且在地面上难免存在植被,导致近地侧的尾流风速很难精准地预测。

5 结论

本文利用两台多普勒激光雷达进行风场实验,对不同风速下的风剪切现象以及尾流分布特征进行了分析,并利用尾流模型对尾流风剖面进行了验证,得到以下结论。

①对比了9种不同风速大小的风剪切现象,随着风速的增加,风剪切效应随之增强,风速每增加1 m/s,对应的风剪切指数约增加0.05。

②对不同来流条件下的尾流风速进行了对比,尾流的长度及宽度随着来流风速的增加而增加,尾流的风剖面和来流风剖面有着相类似的性质,其尾流的风剪切指数和来流风速正相关。

③利用三维尾流模型验证了多种工况下测量的尾流剖面,并对验证结果进行了相对误差分析。

在轮毂中心线附近的尾流拟合结果较好,相对误差基本在10%以内,而由于近地侧受地形的影响,尾流变化复杂,近地侧的尾流预测效果并不是很理想。

参考文献:

- [1] 申新贺,陈广宇,姜婷婷,等.考虑冰冻气候的山地风电场发电量精细化研究[J].可再生能源,2021,39(6):778-783.
- [2] 陈安新,孙锐,王凯,等.基于致动线和大涡模拟的不同入流风况下的风力机尾流特性研究[J].可再生能源,2021,39(10):1354-1361.
- [3] 张双益,胡非.大气边界层与风力发电的相互作用研究综述[J].高原气象,2017,36(4):1127-1137.
- [4] 季明彬,高晓霞.基于激光雷达测风数据的复杂地形下风力机尾流特性研究[J].大气科学学报,2020,43(2):416-423.
- [5] 赵飞,李兵兵,蔚步超,等.考虑风切变的风电场尾流模型实验研究[J].中国测试,2020,46(1):154-159.
- [6] 韩星星,许昌,Shen W,等.大气稳定度对山地风力机功率影响研究[J].工程热物理学报,2021,42(7):1733-1734.
- [7] 王胜军,张明明,徐建中.均匀入流风力机模型尾流特性实验研究[J].工程热物理学报,2015,36(8):1682-1686.
- [8] 董彦斌.基于人工合成湍流风场的山地地形对风力机尾流特性影响研究[D].兰州:兰州理工大学,2020.
- [9] 杨瑞,全佩,张康康.风切变效应对风力机叶片结构性能的影响分析[J].机械设计与制造,2021(5):172-175.
- [10] Sun H, Yang H. Study on an innovative three-dimensional wind turbine wake model [J]. Applied Energy, 2018, 226: 483-493.
- [11] Gao X, Li B, Wang T, et al. Investigation and validation of 3D wake model for horizontal-axis wind turbines based on filed measurements [J]. Applied Energy, 2020, 260: 114272.
- [12] Gao X, Zhang S, Li L, et al. Quantification of 3D spatiotemporal inhomogeneity for wake characteristics with validations from field measurement and wind tunnel test [J]. Energy, 2022, 254: 124277.

Study on wake distribution under different wind shear characteristics

Li Zepeng, Zhang Fuguo, Zhou Chuan, Wu Peng, Li Xiaoen

(State Power Investment Corporation Research Institute Co.,Ltd., Beijing 102209, China)

Abstract: In view of the insufficient research on the influence of wind shear on wake at present, two lidars were used to carry out wind field experiments in a wind farm, analyzed the phenomenon of wind shear under different wind speeds and the characteristics of wake change under different incoming flow conditions, and used a three-dimensional wake model to verify the vertical wake profiles. The results show that the wind speed has an obvious effect on wind shear, and the wind shear effect increases with the increase of wind speed, and the wind shear index increases about 0.05 for every 1 m/s increase of the wind speed. The wind shear effect has a great influence on the distribution characteristics of the wake. The stronger the wind shear effect is, the greater the gradient of the wake velocity along the height direction, and the greater the width and length of the wake. The predicted curve of the model near the hub center line of the wind turbine and the measured wake data fit well, and the relative errors are basically within 10%, while the relative errors of the prediction near the ground side are large due to the influence of the terrain.

Keywords: wind field experiment; wind shear; wake; Laser Radar