

基于致动线模型两风机尾流场数值模拟

艾勇, 程萍, 万德成*

(上海交通大学 船舶海洋与建筑工程学院 海洋工程国家重点实验室
高新船舶与深海开发装备协同创新中心, 上海 200240)

*通信作者: dcwan@sjtu.edu.cn

摘要: 在风电场中, 风机之间存在十分复杂的尾流相互干扰现象, 这会对风机的功率输出, 叶片载荷等都会产生十分显著的影响。本研究采用致动线模型以及 CFD 数值模拟方法, 研究两风机之间的复杂尾流干扰效应。在保持两风机纵向间距一样的情况下, 数值模拟两风机在不同横向间距下其部分尾流相互干扰现象, 分析两风机的气动功率输出特性, 尾流速度变化特性以及尾流干扰效应。数值模拟结果表明: 在上下游风机在沿着流向方向距离保持不变的情况下, 随着横向间距的变化, 上下游风机的尾流存在十分复杂的尾流相互干扰效应, 对下游风机的气动功率输出以及两风机风电场的整体流场产生了显著的影响。

关键词: 风电场; 致动线模型; 气动功率; 尾流干扰效应

1 引言

随着全球经济的迅猛发展, 传统化石能源的枯竭现象与环境污染问题日益严重, 可再生能源的开发成为各国关注的焦点。风能作为一种清洁的可再生能源, 成为近年来能源开发领域的研究热点。为了提高风能利用率, 获得更高的发电量, 需要进行风机集群化, 形成大型风电场, 进行集成并网风力发电。由于大型风电场中风机之间存在明显的尾流干扰效应, 对风场的整体功率输出与有较大的影响, 十分有必要对此进行相关的研究分析。

针对于风电场的尾流干扰效应, 此前已有许多的研究学者使用不同的研究手段进行了大量的研究分析。主要包括数学尾流模型方法, 模型研究手段以及 CFD 数值模拟方法。Troldborg 等^[1]指出尾流模型没有能真实地捕捉到风电场的尾流的湍流特性, 而湍流对于风机尾流特性特别是尾流相互干扰来说是十分重要的一个因素, 其对于风机的气动性影响是十分显著的; 另有一方面, 实验研究手段带来的一个明显的问题就是其存在显著的尺度效应, 这对于尾流干扰效应的研究还是存在很大的影响。Montavon 等^[2]的研究表明利用 CFD 技术可以很好地模拟风电场, 其能考虑到湍流影响, 不存在尺度效应问题。很多学者利用

该方法进行了风机尾流相互干扰问题的研究。Choi 等^[3-4]使用了 CFD 求解器 ANSYS-CFX 对 2 风机和 3 风机风电场的气动性能以及尾流干扰效应进行全三维的数值模拟, 具体研究了风机纵向间距变化对于风电场功率输出的影响。Churchfield 等^[5-6]采用 SOWFA^[7]软件使用大涡模拟方法分析了风机的尾流干扰效应。Fletcher 和 Brown^[8]采用基于 CFD 方法的涡传递模型研究了两风机风电场中的尾流相互干扰现象。其在分别考虑了下游风机位于上游风机全尾流情况和部分尾流的情况下, 研究了两风机风场的尾流干扰效应。Mikkelsen 等^[9]采用致动线和 CFD 相结合的方法, 同样考虑下游风机位于上游风机全尾流区域情况和部分尾流情况下, 研究了 3 个风机的功率输出情况以及多风机之间的尾流相互干扰效应。其研究表明, 风机间距为 5 个风机直径时, 风机的尾流相互干扰影响较小, 总功率提高比较明显。

以上研究均表明, 多风机之间存在显著的尾流相互干扰效应, 这对风机的功率输出, 气动载荷以及叶片疲劳均产生较大的影响。针对于多风机之间的显著尾流干扰效应, 本研究采用致动线模型与 CFD 相结合的方法, 通过固定风机之间样流向的纵向间距, 改变横向间距, 数值模拟下游风机处于部分尾流区域的两风机尾流相互干扰现象, 分析其功率输出特性, 以及尾流速度变化特点。

2 数值方法

2.1 致动线模型

致动线的概念最早由 Sørensen 和 Shen^[10]引入, 它是一种全三维的瞬态气动模型。2003 年, Mikkelsen^[11]使用了 ALM 讨论了叶素动量理论中所做的近似, 并且与 EllipSys3D 求解器相结合, 将其重新应用于原始变量(压力-速度)的 NS 方程。致动线模型的基本思想是将旋转的叶片用虚拟的、承受体积力的线来代替, 因此不需要求解叶片表面边界层, 也不需要动网格技术, 简单的结构化网格即能满足要求, 大大降低了计算时间。

如图 1 所示, 依据叶片翼型的速度三角形, 计算相对速度为:

$$U_{rel} = \sqrt{U_z^2 + (\Omega r - U_\theta)^2} \quad (1)$$

叶片局部的攻角定义为:

$$\alpha = \phi - \gamma \quad (2)$$

其中, $\phi = \tan^{-1}(U_z / \Omega r - U_\theta)$, γ 为叶片局部桨距角。通过攻角进行插值可以得到翼型的升力系数 C_l 以及阻力系数 C_d 。此时每个致动点处的体积力可以由下式计算:

$$f = (L, D) = \frac{1}{2} \rho U_{rel}^2 c \left(C_l \vec{e}_L + C_d \vec{e}_D \right) \quad (3)$$

每个致动元产生的力作为一系列离散的点力不能直接作用于流场, 以避免在数值计算中产生奇异性。需要将其进行体积力光滑, 这里采用 Sørensen 和 Shen^[10]推荐的高斯光滑

函数进行体积力光滑。

于是，流场中 (x, y, z) 处的体积力

$$f_{\varepsilon,i}(x, y, z, t) = f \otimes \eta_{\varepsilon} = \sum_{j=1}^N f(x_j, y_j, z_j, t) \frac{1}{\varepsilon^3 \pi^{3/2}} \exp\left[-\left(\frac{d_i}{\varepsilon}\right)^2\right] \quad (4)$$

其中， (x_i, y_i, z_i) 是第 i 个致动点， d_i 是点 (x, y, z) 与点 (x_i, y_i, z_i) 之间的距离。 ε 称为高斯光滑参数。为了保证数值稳定性，本研究中取 $\varepsilon = 2 \Delta x$ (Δx 为叶片附近网格单元的长度^[12])。体积力 f_{ε} 将作为动量方程的源项，作用于流场，从而代表叶片对流场的干扰作用。

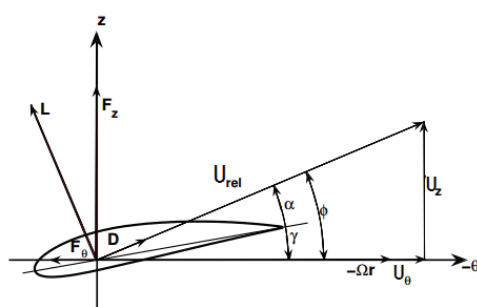


图 1 翼型截面速度质量^[10]

2.2 控制方程

在数值模拟中，采用的控制方程为 RANS 方程，其基本表达式为：

$$\frac{\partial U}{\partial x_j} = 0 \quad (5)$$

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (U_i U_j) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \overline{u_i' u_j'} \right) + \frac{1}{\rho} f \quad (6)$$

其中， U 是流场速度， ρ 是流体密度， p 是流场压力， ν 是运动黏度， f 是由致动线模型计算的体积力。

为了求解上述方程，必须使用一定的湍流模型才能使得方程封闭，达到流场求解的目的。本研究使用 SST $k-\omega$ 湍流模型来进行方程的封闭。

3 计算设定

NREL-5MW 风机^[13]是美国国家能源部可再生能源实验室研发的一种风机类型，其叶片翼型由 cylinder 系列，DU 系列以及 NACA64 系列组成。计算包含两个相同的该类型的风

机。其关键技术参数如表 1 所示，两风机风场布置如图 2 所示。

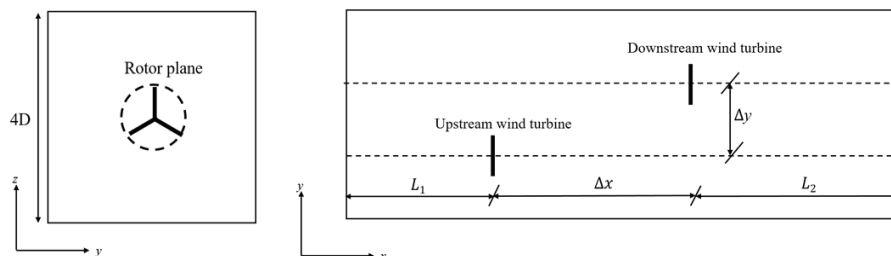


图 2 两风机风场布置形式

表 1 NREL 5MW 风机技术参数

名称	参数
Rating	5 MW
Rotor Orientation	Upwind
Number of blades	3
Rotor Diameter, Hub Diameter	126 m, 3 m
Hub Height	90 m
Cut-in, Rating, Cut-out	3 m/s, 11.4 m/s, 25 m/s
Cut-in, Rating Rotor Speed	6.9 rpm, 12.1 rpm

如图 2 所示，计算域沿着流向距离是 $10D$ ，其中 D 为风轮直径， $D=126\text{m}$ ，沿着横向以及高度方向的距离均为 $4D$ ，上游风机距离入口的距离 $L_1=2D$ ，下游风机距离出口的距离 $L_2=3D$ 保持上游风机和下游风机的前后间距 $\Delta x=5D$ ，改变上游风机和下游风机的横向间距，使得下游风机处于上游风机的部分尾流区域中，通过这种设定，研究分析下游风机在部分尾流区域中时，上下游风机的尾流相互干扰效应。横向间距以三分之一半径为基本变量，进行一系列的变化，即， $\Delta y/\frac{R}{3}=0\sim 6$ ，表示下游风机从完全处于上游风机尾流区到基本脱离上游风机的尾流区。

对于网格的处理，首先在建立一个全区域的背景网格区域，再利用 OpenFOAM 的 sappyHexMesh 工具进行网格的加密，这是为了更好的捕捉到上下游风机的叶尖以及叶根涡结构，以及两风机之间的尾流干扰现象。其网格示意图如图 3 所示，加密区在流向方向上一直延伸至出口处，避免了较大的尾涡耗散，在高度以及宽度方向上保持为 $2D$ ，充分考虑尾流的膨胀现象。

所有的数值模拟均为定常入流，来流速度保持为 11.4m/s 不变，不考虑风剪切以及湍流入流的影响。时间步长的选取依据 CFL 条件，在库朗数小于的情况下，分别考虑流向风速以及叶尖的旋转速度，最终取最小的时间步长为 0.005s ，以满足计算，避免出现比较大的数值耗散，导致数值模拟的发散。

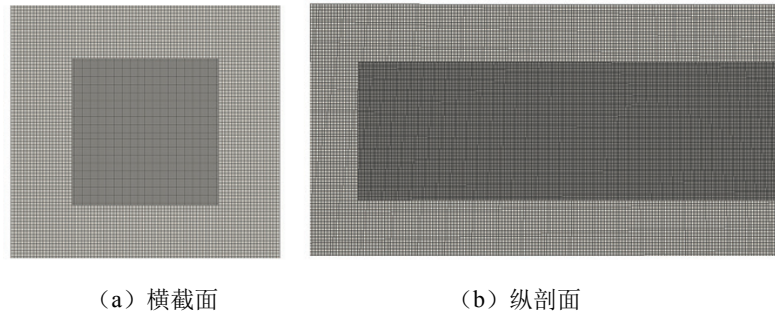


图3 网格示意图

3 计算结果与分析

3.1 气动功率输出特性

图4表示的是在不同计算工况下,下游风机气动功率输出以及功率比随两风机的横向间距变化曲线图。功率比表示的是下游风机气动功率输出与上游风机的气动功率输出的比值。图4结果表明,下游风机的气动功率输出与两风机之间的横向的关系是呈现出一种十分明显的非线性关系。

当两风机的横向间距为0时,表明下游风机是处于上游风机的全尾流区域中,两者的尾流相互干扰效应十分明显,下游风机的气动输出约为2MW,在前后间距为5D的大间距情况下,下游风机的气动功率输出仅是上游风机气动功率输出的38.68%。当横向间距逐步增加时,下游风机的气功率输出也随之增加。但是,在不同的间距范围内,其增加的速度也呈现出一定的差异。在一个0到一个1/3个半径内,由于下游风机绝大部分都处于上游风机的尾流区域内,两者之间的尾流干扰十分严重,下游风机风轮平面处的速度损失比较严重,速度恢复比较缓慢,攻角较小,升力对于扭矩的贡献较小,导致了其气动扭矩减小,从而使得其气动功率的输出增加不是很明显。横向间距为一个三分之一半径时,功率比约为44.25%,与横向间距为0的情况相比,仅仅增加了5.57%。而当横向间距在2个1/3半径和5个1/3半径时,下游风机的气动功率大幅增加,其功率比的变化相应为56.85%到95.57%之间。横向间距在这个区间时,增长幅度几乎为13%,大约是横向间距在0和一个1/3个半径时的增长幅度的2倍。这是因为随着横向间距的大幅度增加时,下游风机部分甚至是小部分处于上游风机的尾流影响区内,两风机之间的尾流相互干扰影响逐步减弱,下游风机风轮附近速度恢复迅速。而当横向间距在5个和6个1/3半径时,下游风机仅仅小部分的风轮平面处于上游风机的尾流区,其功率比分别为95.57%和96.44%。此时的功率增长幅度十分微小,其曲线变化近似为一条平线。这表明,下游风机和上游风机的尾流干扰效应十分微弱,其对下游风机的风轮平面的速度影响十分微弱。风轮平面附近的速度大部分恢复。所以,下游风机的功率输出增长十分明显。

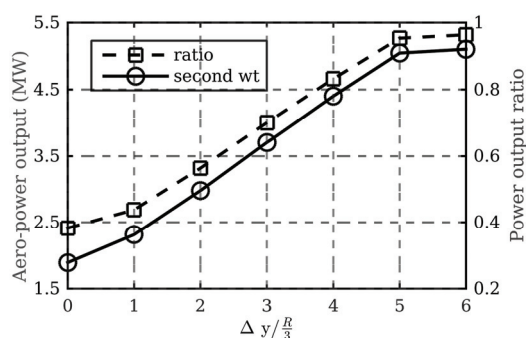


图4 下游风机功率输出以及功率比与横向间距变化曲线

依据上面关于下游风机气动功率输出以及功率比随着两风机横向间距变化特性的讨论，可以得出，当两风机之间的横向间距比较小时，此时的下游风机几乎全部处于上游风机的尾流区内，两风机之间的尾流相互干扰效应十分显著，导致下游风机风轮平面处的速度损失比较厉害，其气动功率输出也相应的比较小，功率增长幅度比较微弱。而随着横向间距的逐步增大时，下游风机只有部分风轮平面位于上游风机尾流区域内，此时的尾流干扰的影响逐步减小，风轮平面的速度逐渐恢复，速度损失没有全尾流区情况那么严重。当横向间距增加到2个半径时，也就意味着在不考虑尾流膨胀下，上下游风机的风轮平面完全错开。理论上其功率输出时一致的，正是由于上游风机尾流的膨胀，导致这种情况下，上下游风机依旧存在比较微弱的尾流干扰效应，所以其功率输出并不完全一致，下游风机的功率输出会有比较小的损失，但是这个损失大约在5%以内。

3.2 尾流特性

图5(a)~(g)展示了横向间距分别为0到2倍直径时，在不同流向位置处流场轴向速度沿着横向截面宽度变化的示意图。其中，上游和下游的风机在流向方向的距离均保持为5个风轮直径。

由图4可以看出，当上下游风机的横向间距在0~2倍直径变化时，上游风机的尾流在6个直径的范围内，流场中的轴向速度沿着横向宽度的变化的曲线均有着十分大的相似性：均在中心有着一个向右的凸起以及两个向左的凸起。意味着在轮毂中心线的位置流场中的速度均呈现出一种速度恢复现象，而两个向左的凸起则意味比较大的速度损失。这是因为，向右的凸起是因为这个位置是位于风轮平面的轮毂中心处，一方面，由于没有考虑轮毂与机舱对于流场的影响，另一方面，对于叶根处的翼型为圆柱形翼型，相对于叶片的其他翼型，其对于流场的影响比较小，因此，在轮毂中心线的位置，沿着不同流向位置截面处的速度变化都呈现出一个向右的凸起，这个凸起意味流场中尾流速度的恢复。两个向左的凸起的宽度大约为一个直径，而且均等的分布在中心线的两侧。这是由于该地方的风轮平面的起到了吸收风能的作用，所以在这些地方均会出现较大的速度损失。

当上游和下游风机的横向间距再见逐渐增大时，可以发现流场的轴向速度沿着横向位置变化的曲线呈现出高度的非对称形状。当横向间距在比较小的范围之类，如在1/3倍半

径到一倍半径之内变化时，其变化不是很大，但是其向左凸起比较显著，这表明了，此时下游风机的风轮平面绝大部分是处于上游风机的尾流区域内的，因此，两者的尾流相互干扰比较严重，速度损失比较厉害，这也正好解释了为什么下游风机的气功率输出比较小的现象。而当横向间距超过一个半径时，此时的轴向速度分布呈现出十分复杂的特性。当上游和下游的风机尾流相互干扰时，在 6 倍直径的尾流处，其速度分布不再是包含一个右凸起和两个左凸起，而是呈现于一种复杂的非线性特性。横向间距的增大，会导致上游风机尾流

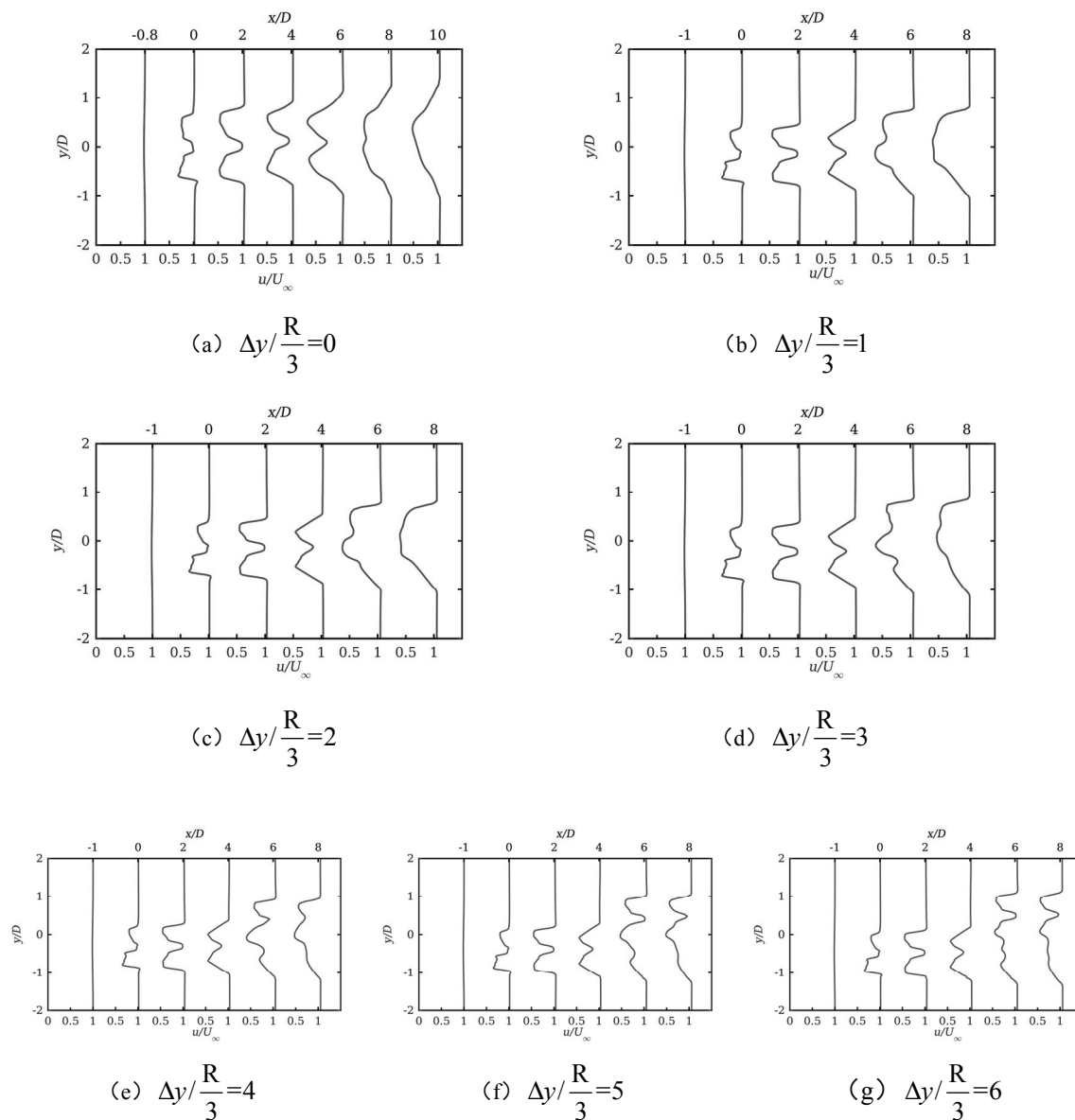


图 5 不同流向位置处的轴向速度沿着横向宽度变化曲线

在没有下游风机相互干扰的情况下，其尾流速度呈现出一个逐步恢复的现象，而当两个风轮平面有相互重叠的区域内，尾流相互干扰十分严重，呈现出十分复杂的尾流场。

从轴向速度沿着横向位置的分布曲线，可以进一步的统计出两风机尾流相互干扰的尾流影响区域范围。当两者的横向间距比较小时，两风机整体尾流严重影响区近视为 1 个风轮直径，考虑到尾流的膨胀现象，在尾流相互干扰的影响区域，会有一定的扩大。当横向间距逐步增大时，其两个尾流相互干扰的影响范围会呈现出明显的扩大，这个对于大型风场的风机位置布置具有重要的参考意义。

4 结论

针对于多风机之间的尾流干扰效应，本文采用致动线模型以及 CFD 数值模拟的方法，保持两风机之间的流向距离不变，通过改变风机之间的横向间距，使得下游风机在处于部分尾流区域情况下，数值模拟两风机之间的尾流相互干扰现象，分析其功率输出特性，以及尾流速度变化特点。数值模拟结果表明：上下游风机沿着流向距离保持不变时，随着两风机之间横向间距的变化，上下游风机的尾流存在十分复杂的相互干扰效应，这对下游风机的气动功率输出以及两风机风电场的整体流场均产生了显著的影响。当横向间距比较小时，下游风机位于上游风机的大部分甚至全部尾流区域位。尾流损失十分严重，气动功率输出增长十分缓慢；当间距在 1 倍半径和 2 倍半径之内变化时，下游风机位于上游风机的部分甚至小部分尾流区域内，尾流相互干扰效应比较弱，气动功率输出正常迅速，增长幅度约为小横向间距时的 2 倍；当横向间距超过 2 个半径时，考虑到上游风机尾流膨胀现象，下游风机只 4 位于上游风机的很小部分尾流区域之内，两者之间尾流干扰效应十分微弱，流场内的速度恢复较快，总体功率输出增长十分明显。

致谢

本文工作得到国家自然科学基金项目(51379125, 51490675, 11432009, 51579145)、长江学者奖励计划(T2014099)，上海高校东方学者特聘教授岗位跟踪计划(2013022)，上海市优秀学术带头人计划(17XD1402300)，上海市船舶工程重点实验室基金项目(K2015-11)，以及工信部数值水池创新专项 VIV/VIM 项目(2016-23/09)的资助。在此一并表示衷心感谢。

参考文献

- 1 Trolborg N, Larsen G C, Madsen H A, et al. Numerical simulations of wake interaction between two wind turbines at various inflow conditions[J]. *Wind Energy*, 2011, 14(7): 859-876.
- 2 Montavon C A, Jones I P, Staples C, et al. Practical issues in the use of CFD for modelling wind farms[C]. *Proc European Wind Energy Conference*, 2009.
- 3 Choi, Nak Joon, et al. CFD Study on Aerodynamic Power Output Changes with Inter-Turbine Spacing Variation for a 6 MW Offshore Wind Farm. *Energies*, 2014, 7(11): 7483-7498.
- 4 Choi, Nak Joon, et al. Numerical study on the horizontal axis turbines arrangement in a wind farm:

- Effect of separation distance on the turbine aerodynamic power output. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2013, 117: 11-17.
- 5 Churchfield, Matthew, et al. "A large-eddy simulations of wind-plant aerodynamics." 50th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition. 2012.
- 6 Churchfield, Matthew J., et al. "A numerical study of the effects of atmospheric and wake turbulence on wind turbine dynamics." *Journal of turbulence*, 2012, 13: N14.
- 7 Churchfield M , Lee S. NWTC design codes-SOWFA[J]. URL : <http://wind.nrel.gov/designcodes/simulators/SOWFA>, 2012.
- 8 Fletcher, Timothy M., and Richard E. Brown. "Simulation of wind turbine wake interaction using the vorticity transport model." *Wind Energy*, 2010, 13(7): 587-602.
- 9 Mikkelsen, Robert, et al. Analysis of power enhancement for a row of wind turbines using the actuator line technique[J]. *Journal of Physics*, 2007,75(1): 1-8.
- 10 Sørensen J N, Shen W Z. Numerical Modeling of Wind Turbine Wakes[J]. *Journal of Fluids Engineering-transactions of The Asme*, 2002, 124(2): 393-399.
- 11 Mikkelsen, Robert. Actuator disc methods applied to wind turbines. Diss. PhD thesis, Technical University of Denmark, 2003.
- 12 Sørensen, John Dalsgaard, and Jens N. Sørensen, eds. *Wind energy systems: Optimising design and construction for safe and reliable operation*. Elsevier, 2010.
- 13 Jonkman, Jason, et al. "Definition of a 5-MW reference wind turbine for offshore system development." National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, Technical Report No. NREL/TP-500-38060, 2009.

Numerical simulation of wake interaction between two wind turbines based on actuator line model

AI Yong, CHENG Ping, WAN De-cheng*

(Collaborative Innovation Center for Advanced Ship and Deep-Sea Exploration, State Key Laboratory of Ocean Engineering, School of Naval Architecture, Ocean and Civil Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

*Corresponding author: dcwan@sjtu.edu.cn

Abstract: There is complex and significant phenomenon of wake interaction which has great influence in the aerodynamic power output, blade loads and flow speed for turbine in the wind farm. In this paper, the actuator line model combined with CFD technique will be applied to study the complex phenomenon of wake interaction between two wind turbines. In the case of maintaining the longitudinal spacing of the two wind turbines, numerical simulations will be conducted to study the characteristics of aerodynamic power output and wake speed variation and the wake interaction under different cross spacing. The results of numerical simulation show that with the change in lateral spacing, the wake interaction has significant and complex influence the upstream and downstream wind turbine. The aerodynamic power output of downstream wind turbine changes obviously with respect to the spacing of cross direction.

Key words: Wind farm; Actuator line model; CFD; Wake interaction; Aerodynamic power