

Research on the Influence of the Unit Spacing on the Performance of Wind Turbines

Jin Jiang¹, Gang Lan¹, Dongdong Li¹, Wanshuang Yi¹, Guoyu Zhang^{1,2}

¹College of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan
²China Guangdong Nuclear Power Holding CO. Ltd., Shenzhen
Email: jiangjin2214@yahoo.com, 782633100@qq.com

Received: Feb. 25th, 2013; revised: Mar. 18th, 2013; accepted: Mar. 27th, 2013

Copyright © 2013 Jin Jiang et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Abstract: For effective use of limited land where ample wind resources exist, and in order to reduce the wake interaction between wind turbines, a numerical simulation has been carried out to two turbines on the same direction flow in different spacing using software Fluent. The analysis of the aerodynamic performance and characters and the influence of the wake effect on the power of the downstream turbine is provided according to the pressure distribution, velocity distribution, turbulence intensity and velocity of the impeller and the whole wind turbine. At last, suggestions on the best arrangements of the wind turbines are presented.

Keywords: Wind Turbine; Unit Spacing; Wake Interaction; Numerical Simulation

风电场中机组间距对风力机性能影响研究

蒋 劲¹, 兰 刚¹, 李东东¹, 易万爽¹, 张果宇^{1,2}

¹武汉大学动力与机械学院, 武汉
²中国广东核电集团有限公司, 深圳
Email: jiangjin2214@yahoo.com, 782633100@qq.com

收稿日期: 2013 年 2 月 25 日; 修回日期: 2013 年 3 月 18 日; 录用日期: 2013 年 3 月 27 日

摘 要: 为有效的利用风力资源和土地资源, 使风力机间的尾流影响降到最低。利用 Fluent 软件对同方向来流的两台风力机的风电场, 在 3 个不同间距条件下模拟出风力发电机组运行工况下的流场, 并分析不同间距条件下的风力机整机气动性能的特点和差异, 以及尾流对下风向风力发电机组功率的影响, 观察其叶轮表面以及整机的压强分布、流速分布、湍流强度、流速矢量等流态图, 并对风电场风力机的布置提出建议。

关键词: 风力机; 机组间距; 尾流干扰; 数值模拟

1. 引言

在风电场中, 风经过旋转的风轮后会发生方向与速度的变化, 这种对初始空气来流的影响称之为风力机的尾流效应。在风场实际运行中, 风轮做功后风速降低, 湍流度增加, 风的品质降低, 处于尾流区域的下风向风力机在涡流中运行, 能量输出减少, 且机组动力载荷增加。为了减小风力机的尾流效应对下游风

机的影响, 可以考虑增大风力机间的间距, 但具有风能的土地却是有限的, 如何在有限的土地上, 合理布置风力机组, 充分利用风能, 风力机间的间距是关键。

国内外有关大型风力机风轮流场的研究主要分为实验研究和数值模拟两种。Sven Schmitz, Jean-Jacques Chattot 对 NREL 翼型进行了气动性能预测, 并用涡旋线方法预测了风力机尾流^[1]。Wouter Haans, Tonio Sant 测量了在偏航条件下水平轴风力机叶尖小

翼的尾流情况^[2]。Jens Nørkær Sørensen 对 LM 叶片进行了数值建模,并给出了尾流气动细节^[3]。国内基于基础空气动力学以及 CFD 数值模拟理论对风力机多阵列的研究还比较少。郭静婷对不同间距的风力机叶片尾流流场进行了二维模拟,在风力强度及风向相同时,比较不同叶片间距下的尾流特点^[4]。李少华等对不同排列情况下固定距离的两台风力机进行了数值模拟,通过比较单机风力及不同角度布置下两台风力机的输出功率和流场分布,对风力机间相互影响造成的功率损失进行了分析^[5]。张果宇通过对风力机整机在额定风速和多个非额定风速的工况下进行气动性能的数值模拟计算,分析了不同风速工况下的风力机整机气动性能的特点和差异,计算了叶轮扭转力矩、输出轴功率和风能利用效率等性能参数^[6]。

本文结合 CFD 数值模拟和风力机尾流模型,构建同方向来流的两台风力机的风电场三维模型,在 3 个不同间距条件下模拟出风力发电机组运行工况下的流场,并分析不同间距条件下的风力机整机气动性能的特点和差异,以及尾流对下风向风力发电机组功率的影响,观察其叶轮表面以及整机的压强分布、流速分布、湍流强度、流速矢量等流态图,并对风电场风力机布置提出了建议。

2. 数值计算

2.1. 控制方程

流体流动要受物理守恒定律的支配。基本的守恒定律包括:质量守恒定律、动量守恒定律、能量守恒定律。控制方程即为这些守恒定律的描述。这些控制方程虽然变量各不相同,但均反映了单位时间单位体积内物理量的守恒性质。如果用 φ 表示通用变量,各控制方程可以表示成以下通用形式:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \text{div}(\rho u\varphi) = \text{div}(\Gamma \text{grad}\varphi) + S \quad (1)$$

其展开形式为:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u\varphi)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v\varphi)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w\varphi)}{\partial z} \\ & = \frac{\partial}{\partial x}\left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial y}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\Gamma \frac{\partial\varphi}{\partial z}\right) + S \end{aligned} \quad (2)$$

式中, ρ 为流体密度, u 为速度矢量, φ 为通用变量, Γ 为广义扩散系数, S 为广义源项。上式各项依次为瞬态项、对流项、扩散项和源项^[7]。

2.2. 建立几何模型及划分网格

本文根据 1.5 MW 风力发电机的参数建立三维数值计算模型,风力发电机额定风速 V_r 为 11.8 m/s,启动风速为 3.0 m/s,切出风速为 22.0 m/s。风轮直径为 77 m,风力机尖速比为 5.9,额定转速为 17.3 rpm。

选用 FFA-W3-211 翼型进行叶片建模。轮毂简化模型采用直径 2 m 的圆球,机箱由一个长 2 m 的圆锥体和一个直径 3 m,长 9 m 的圆柱体合并而成。塔柱圆锥体上顶面直径 3 m,下底面直径 4 m,高 90 m。两机间距为 5.5 D(440 m)、7.0 D(560 m)、8.5 D(680 m)。叶片旋转流体是包罗叶轮的扁圆盘,风力机流体是包罗整个风力机的流场,双机风场由一个长方体构成,长宽高分别为:900 m、200 m、200 m,如图 1 所示。由于叶轮的几何外形较复杂,叶轮网格划分采用非结构化三角面网格,对叶片及轮毂进行局部加密处理,如图 2 所示,而整机和流场网格划分采用相对较稀疏的四面体网格。其中:四面体网格 1,742,398 个;三角面网格 3,531,476 个;节点 314,756 个。

2.3. 边界条件设定

本次三维模型的气动数值模拟计算,基于稳态不可压缩流动三维定常雷诺时均 N-S 方程(RANS),采用分离式求解器(Segregated)隐式求解(Implicit),速度是绝对速度(Absolute),紊流模型选用 RNG k- ϵ 模型,



Figure 1. Machine spacing of 8.5 D wind farm modeling diagrams
图 1. 两机间距为 8.5 D 的风场建模图

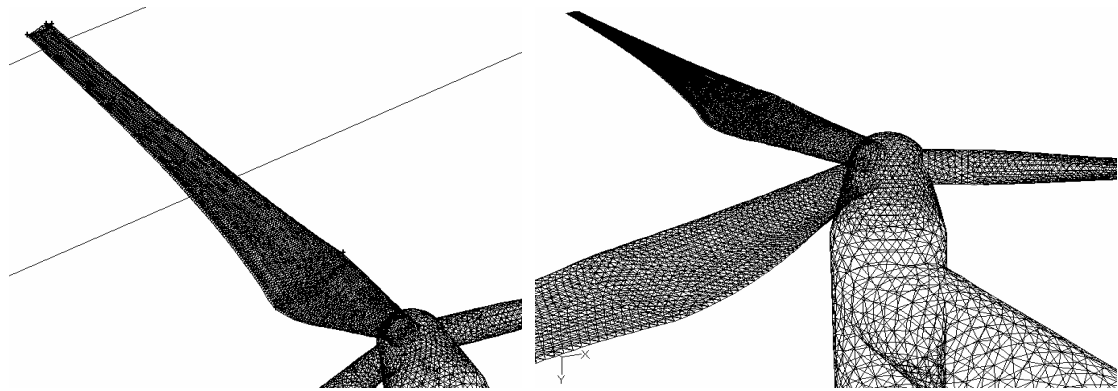


Figure 2. Blades meshing
图 2. 叶片网格划分图

动量采用二阶迎风离散格式(Second Order Upwind), 压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法。

流体材料设为空气。速度进口 11.8 m/s。压力出口 0 Pa。圆周边界速度进口 11.8 m/s, 注意轴向的设置, 保证垂直进口壁面。叶轮旋转流体为 MRF 模型, 17.3 rpm, 方向右手定则确定。叶片壁面为旋转壁面, 相对旋转速度 0, 方向右手定则确定。

3. 计算结果与分析讨论

在进行三种间距风力机气动数值模拟计算收敛结束后, 对各个间距条件下风力机的绕轴旋转扭矩输出并记录下来, 并对记录数据和计算数据进行整理和分析。并观察其整机和风场的流态图。

3.1. 双机气动数值模拟计算结果、数据

在 Fluent 软件计算收敛后, 导出需要的性能参数。采用下述计算公式计算风力机叶片的轴功率。

$$N = M\omega \quad (3)$$

N 为风力机叶片接受到的轴功率, M 为叶片的扭转力矩, ω 为旋转速度。

三种间距风力机气动数值模拟计算结果见表 1。

3.2. 双机气动数值模拟计算分析和性能预测

根据上面对三种间距风力机气动数值模拟计算结果和性能预测数据的分析, 从表 1 中的数据可以得出以下结论:

前面机组的功率要比后面机组功率高出 25%左右。5.5 D、7.0 D、8.5 D 间距与前一机组效率比值分别为: 80.7945%、79.6740%、79.8876%。

数据显示 5.5 D 间距的综合效率是最高的。5.5 D、7.0 D、8.5 D 间距与前一机组风能利用系数之和分别为: 0.3962、0.3939、0.3946。

3.3. 双机及其局部的气动压力、流速、湍流和流速矢量图

从双机风电场中叶轮、整机和风场的气动压力、流速、湍流和流速矢量图, 可以直观和感性的认识和观察前后两台机组叶轮和整机气动特性和流动现象及其差异, 以及其压力、流速等重要气动参数的分布特点。

图 3 和图 4 分别为 8.5 D 间距双机叶轮的气动压力图和湍流强度图。通过图 5、图 6 机组叶轮进出口截面速度分布图和图 7 不同间距双机模型 $X = 0$ 截面速度分布图观察并结合表 1 的性能参数, 可以看出上风向风力机尾流的影响, 下风向机组叶轮进口截面速度明显小于上风向机组进口截面速度, 且下方向机组尾流速度衰减明显大于上风向风力机。由于上下风向风力机间相互的影响, 当机组间距较大时, 上风向机组的输出功率较高, 但并不是间距越大, 下风向机组的输出功率也较高, 数据显示 5.5 D 间距的综合效率最高。

4. 结论

通过构建同方向来流的两台风力机的风电场, 在 5.5 D、7.0 D、8.5 D 不同间距条件下对两台风力机进行气动数值模拟计算, 模拟出风力发电机组运行工况下的流场。观察叶轮进出口截面以及整机的压强分布、流速分布、湍流强度等流态图。分析不同间距的

Table 1. Wind turbine aerodynamic numerical simulation results of different machine spacing
表 1. 三种间距风力机气动数值模拟计算结果

	8.5 D 01 机组	8.5 D 02 机组	7 D 01 机组	7 D 02 机组	5.5 D 01 机组	5.5 D 02 机组
间距 m	0	680	0	560	0	440
X 轴转矩 Nm	17306.83	-6934.71	17556.09	-16248.10	17045.05	-10744.90
Y 轴转矩 Nm	567375.33	453262.77	567024.24	451770.66	566808.24	457949.94
Z 轴转矩 Nm	15171.06	-8475.50	15451.76	-30277.64	14337.68	-46263.22
X 轴分力 N	-557.38	-13.54	-547.68	-357.29	-529.19	108.46
Y 轴分力 N	284986.72	265163.72	284934.59	265401.83	284868.13	267095.13
Z 轴分力 N	418.36	233.58	421.74	555.02	423.05	754.18
塔柱受力 N	22685.62	18100.08	22015.98	17159.61	22035.40	19395.99
转矩功率 kw	1027.88	821.15	1027.25	818.45	1026.86	829.65
来流风能 kw	4686.22	4686.23	4686.23	4686.23	4686.23	4686.23
风能利用系数	0.2193	0.1752	0.2192	0.1746	0.2191	0.1770

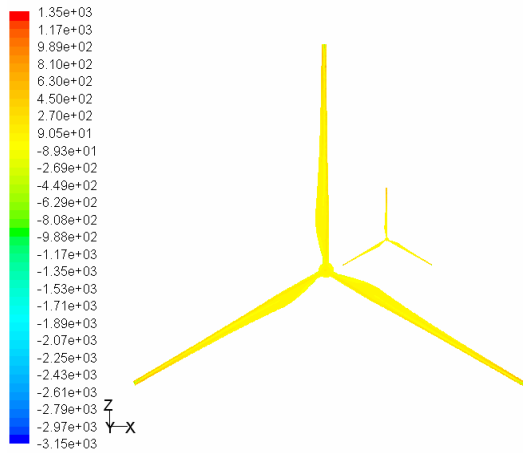


Figure 3. 8.5 D spacing impeller pneumatic pressure
图 3. 8.5 D 间距双机叶轮气动压力图

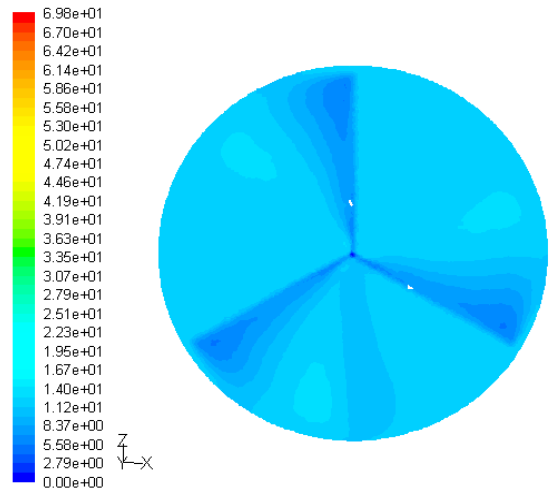


Figure 5. 8.5 D spacing 01 unit speed distribution of the impeller import and export section
图 5. 8.5 D 间距双机模型 01 机组叶轮进出口截面速度分布图

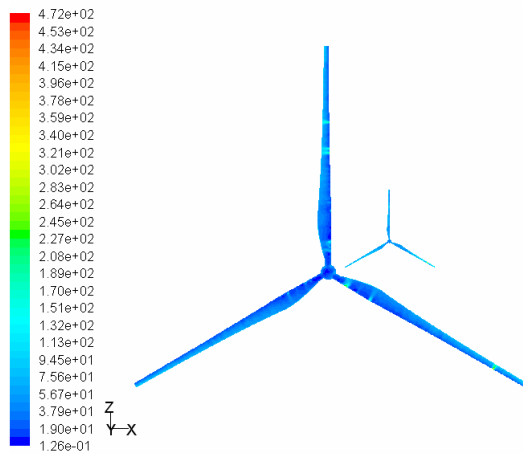


Figure 4. 8.5 D spacing impeller turbulence intensity
图 4. 8.5 D 间距双机叶轮湍流强度图

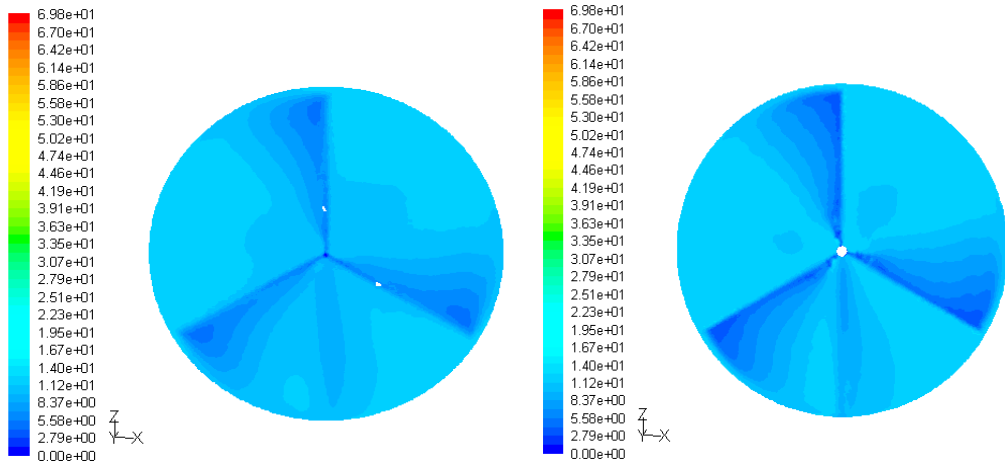


Figure 6. 8.5 D spacing 02 unit speed distribution of the impeller import and export section
图 6. 8.5 D 间距双机模型 02 机组叶轮进出口截面速度分布

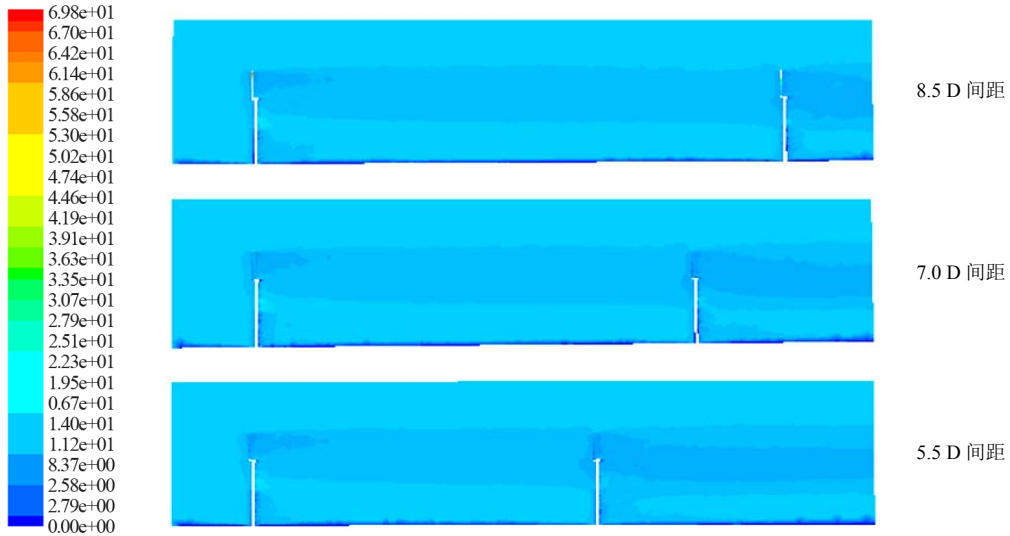


Figure 7. Different spacing $X = 0$ cross-sectional velocity distribution
图 7. 不同间距双机模型 $X = 0$ 截面速度分布图

条件下的风力机整机气动性能的特点和差异，以及尾流对下风向风力发电机组功率的影响。前面机组的功率要比下风向机组功率高出 25% 左右。5.5 D、7.0 D、8.5 D 间距与前一机组效率比值分别为：80.7945%、79.6740%、79.8876%。5.5 D 间距的综合效率最高。5.5 D、7.0 D、8.5 D 间距与前一机组风能利用系数之和分别为：0.3962、0.39395、0.3946。

作者建议可以在风电场尝试 5.5 倍风轮直径的机组间距来安装风力发电机组，从而大大减少了风电场的占地面积，适合于更大规模的开发风能资源，更有效的利用风能资源。7 倍风轮直径的机组间距在数值模拟中并没有表现出更好的风能利用效果。所以一般

风电场风力机安装布置的间距 7.0 D 左右的经验间距有待进一步检测和实验确认。

参考文献 (References)

- [1] S. Schmitz, J.-J. Chattot. Characterization of three-dimensional effects for the rotating and parked NREL phase VI wind turbine. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2006, 128(4): 445-454.
- [2] W. Haans, T. Sant, G. van Kuik and G. van Bussel. Measurement of tip vortex paths in the wake of a HAWT under yawed flow conditions. *Journal of Solar Energy Engineering*, 2005, 127(4): 456-463.
- [3] J. N. Sørensen, Z. S. Wen. Numerical modeling of wind turbine wakes. *Journal of Fluids Engineering*, 2002, 124(2): 393-399.
- [4] 郭静婷. 用 CFD 方法模拟计算风力机尾流的研究[J]. *可再生能源*, 2010, 28(4): 43-45.
- [5] 李少华, 王东华, 岳巍澎等. 双风力机风向变化时尾流及阵

- [6] 列数值研究[J]. 动力工程学报, 2011, 31(10): 768-772.
- [7] 王福军. 计算流体力学分析——CFD 软件原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2004.
- [6] 张果宇. 风力发电机叶轮气动数值模拟研究与性能预测[D]. 武汉大学, 2008.