

# NREL 5 MW 风力机气动特性的数值模拟研究

左 薇<sup>1</sup>, 李惠民<sup>1</sup>, 芮晓明<sup>2</sup>, 王晓东<sup>2</sup>, 康 顺<sup>2,3</sup>

(1. 中国电力工程顾问集团华北电力设计院有限公司, 北京 100120; 2. 华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 北京 102206; 3. 西安现代控制技术研究所, 西安 710065)

**摘 要:** 以 NREL 5 MW 风力机为研究对象, 忽略风轮的仰角和锥角, 采用 CFD 数值模拟方法并选用 SST 湍流模型研究均匀来流条件下不同风速时风力机的输出功率, 并与 FAST 软件的计算结果进行比较。分析叶片展向不同截面的压力分布和径向速度流场, 讨论风力机尾流场速度和湍动能的变化规律。研究结果表明, 沿着叶片展向自叶根至叶尖, 吸力面压力逐渐降低, 低压区覆盖面积逐渐增大; 压力面压力逐渐升高, 前缘与尾缘附近压力增幅较大。风穿过风轮能量被大量吸收, 风轮对来流的阻塞作用主要集中在近尾流区。风轮后随着流体从近尾流区运动到远尾流区湍动能逐渐减小。

**关键词:** 风力机; 功率; 尾流; 湍流

**中图分类号:** TK83

**文献标识码:** A

## 0 引 言

随着全球石化燃料储备的消耗和日益严重的环境问题, 风电、太阳能等新能源技术成为“能源革命”的重要力量。其中, 风力发电作为目前技术最成熟、最具有规模化开发和商业利用价值的新能源利用形式得到空前发展<sup>[1,2]</sup>。随着风电的发展, 为不断提高风能捕获能力, 风力机装机容量不断增加, 风轮直径不断扩大<sup>[3]</sup>。风轮尺寸增大, 质量增加, 为风力机的设计、维护和控制带来了巨大挑战。叶片的气动特性和结构等需进一步进行研究, 而准确的气动性能分析是研究其他问题的基础。风轮直径的增大亦使得尾流区覆盖面积增加, 尾流造成的气动干扰越来越严重, 较大装机容量的风力机尾流成为研究的热点问题。对于较成熟的机型比如 1.5、2.0、2.5 MW 风力机的气动特性国内外已采用风洞试验和数值模拟方法开展研究, 研究内容较系统深入<sup>[4-9]</sup>。然而, 目前关于 5 MW 以上的风力机尚无详尽的气动特性研究与分析<sup>[10-15]</sup>。

通过实验检验设计方案需很长的研制周期和巨额成本, 风险较大。对于大型风力机来说, 风洞试验不能满足相似准则, 采用实验方法研究其气动特性受到一定限制。随着计算机的发展和计算方

法的不断改进, 采用 CFD 数值模拟方法研究大型风力机的气动特性成为一种有效的计算手段。

为更深入研究大型风力机的气动特性及流场流体扰流的细节, 本文以 NREL 5 MW 风力机为研究对象, 忽略风轮的仰角和锥角, 采用 CFD 数值模拟方法并选用 SST 湍流模型研究均匀来流条件下, 不同风速时风力机的功率, 并与 FAST 软件的计算结果进行比较。分析叶片展向不同截面的压力分布和径向速度流场, 讨论风力机尾流场速度和湍动能的变化规律, 为大型风力机的气动性能设计以及风电场风力机的排布优化提供参考。

## 1 研究模型

NREL 5 MW 风力机是一个数值风力机模型<sup>[14]</sup>, 参考了多种商用风力机原型机, 特别是 Repower 5 M 风力机。NREL 5 MW 风力机为上风向 3 叶片风力机, 采用变速变桨运行控制方式。风轮直径为 126 m, 叶片长度为 61.5 m, 风轮仰角为 5°, 锥角为 2.5°, 轮毂高度约为 90 m。叶片翼型由 DU 系列翼型和 NACA64 系列翼型构成, 叶片展向不同位置处的翼型参数和扭角可参考文献[14,15]。风力机的切入风速为 3 m/s, 切出风速为 25 m/s, 额定风速为 11.4 m/s。转速变化范围在 6.9~12.1 r/min, 额定转

速为 12.1 r/min。叶片桨矩角变化范围为  $0^\circ \sim 90^\circ$ , 最大变桨速率为  $8^\circ/\text{s}$ 。所研究的风力机模型忽略了风轮的仰角和锥角并将机舱简化。选择均匀来流风速分别为 8、10 m/s 及额定风速为 11.4 m/s, 对应的风力机的转速分别为 9.163、11.430 和 12.100 r/min 进行研究。

## 2 数值计算方法

采用 CFD 商用软件求解非定常的雷诺时均 Navier-Stokes 方程, 并选用 SST 湍流模型<sup>[16]</sup>, 假设全场为湍流流动。采用滑移网格法进行转静域交界面的数据传递。风力机的近壁面使用壁面函数。

### 2.1 计算域设定

以风力机风轮回转面质心为基准点, 如图 1 所示的 O 点。静止域大小为  $12D \times 6D \times 6D$  ( $D$  为风力机直径), 其中基准点到左、右边界的垂直距离分别为  $4D$  和  $8D$ 。转动域为圆柱体, 圆柱体底面的直径为 160 m, 圆柱体的高度为 80 m, 其中风轮回转面的质心位于圆柱体的几何中心, 如图 1 所示。

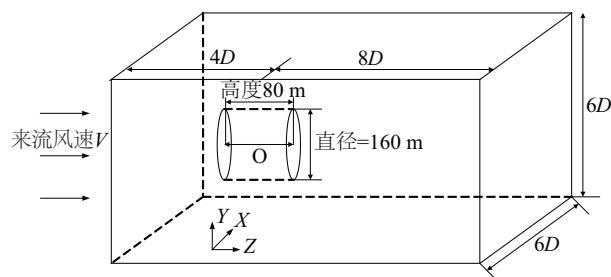


图1 计算域示意图

Fig. 1 Schematic diagram of computational domain

### 2.2 网格划分

网格划分方式参考文献[17]。三维模型加密等级最高达到 Level 6。设定计算域网格是静止的, 等级为 Level 0, 初始网格的最小尺寸为 4 m, 如图 2 所示。

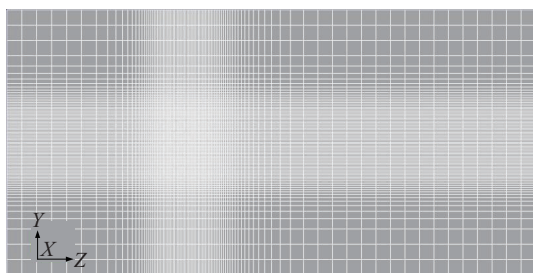


图2 计算域网格

Fig. 2 Grids of computational domain

设定转静面交界的网格为滑移网格, 等级为 Level 2, 如图 3 所示。

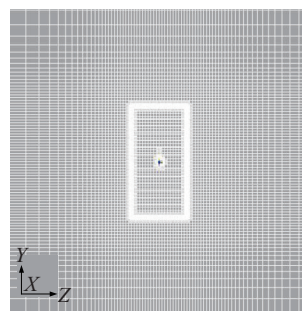


图3 转动域附近的网格

Fig. 3 Grids near the cone

叶片周围的网格等级为 Level 6。图 4 所示为叶片展向 15% 截面处的网格分布。网格总数约为 360 万, 网格的最小尺寸为 0.0625 m。

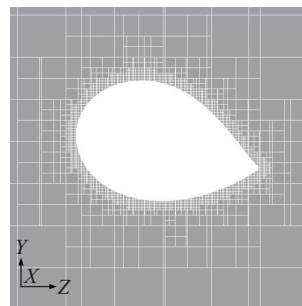


图4 叶片周围的网格(15%截面)

Fig. 4 Grids near the blade (15% cross section)

### 2.3 边界条件

进口边界为计算域的左边界, 如图 1 所示, 给定均匀大气温度和来流速度。计算域的其他边界为出口边界给定标准大气压。叶片表面为无滑移壁面边界条件。

### 2.4 收敛准则

非定常条件下总体性能参数达到稳定认为计算收敛。

## 3 数值结果与分析

### 3.1 功率

目前尚无关于 NREL 5 MW 风力机在不同风速条件下功率输出的实验数据, FAST 软件<sup>[18]</sup>采用此模型作为验证算例, 可得不同风速条件下风力机功率, 故文中将 CFD 的计算结果与 FAST 的计算结果

进行比较。表 1 所示为来流风速为 8.0、10.0、11.4 m/s 时 FAST 软件和 CFD 软件计算的风力机功率,其中 CFD 的计算结果已考虑机械损失和发电损失。由表 1 可见,2 种方法计算的风力机功率均随风速的增加而增加,且功率值较为接近。由于文中所研究的模型忽略了风轮的仰角和锥角并将机舱简化,所以 CFD 的计算结果与 FAST 的计算结果之间存在一定差异,且均略低于 FAST 的计算结果。

表 1 FAST 和 CFD 计算的风力机功率

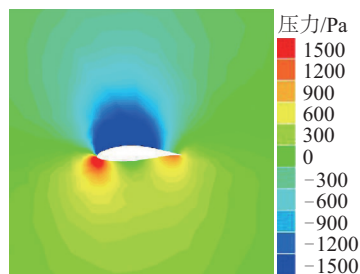
Table 1 Power of wind turbine calculated by FAST and CFD

风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	功率/kW	
	FAST	CFD
8.0	1756	1614
10.0	3418	3282
11.4	4999	4635

下文分析额定风速条件下,一个旋转周期的初始时刻,叶片展向不同截面的压力、速度和风力机尾流场速度的分布,其他时刻压力和速度的变化趋势与此时刻相同。

### 3.2 压力云图

图 5 表示叶片展向不同截面的压力分布,压力的变化范围相同,为  $-1500\sim 1500$  Pa。由图 5 可见,自叶根至叶尖的径向方向,叶片吸力面的压力逐渐降低,低压区覆盖面积逐渐增大,如图 5c 和图 5d 所示,低压区从叶片前缘慢慢发展到叶片尾缘,90%



e. 90%叶片处截面

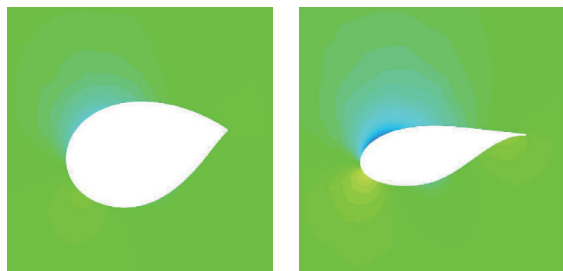
图 5 叶片展向不同截面的压力云图

Fig. 5 Pressure contours of different cross section of blade

截面处叶片的吸力面均位于低压区,如图 5e 所示;叶片压力面的压力逐渐升高,前缘与尾缘附近压力增幅较大。

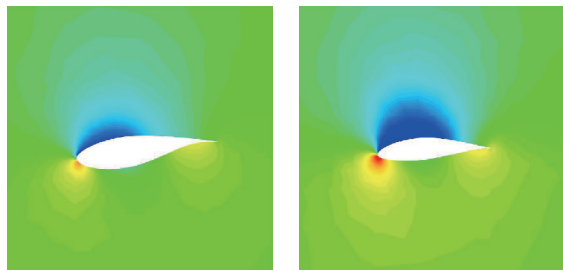
### 3.3 径向速度云图

图 6 所示为叶片展向不同截面的径向速度云图,速度的变化范围相同,为  $0\sim 7$  m/s。由图 6 可见,自叶根至叶尖的径向方向,径向速度先减小后增大。如图 6a 所示,接近叶根处叶片吸力面径向速度较大,二次流动显著;如图 6b 所示,15%截面处叶片吸力面的尾缘附近径向速度较大;如图 6c~图 6e 所示,20%、30%和 50%截面处叶片表面的径向速度均较小;如图 6f 所示,70%截面处叶片表面的径向速度增加,叶片吸力面的径向速度高于压力面的径向速度;靠近叶尖 90%截面处叶片压力面的径向速度增幅较大。



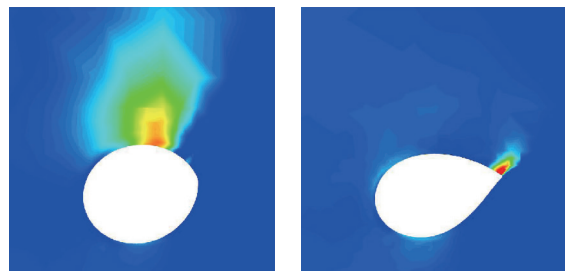
a. 15%叶片处截面

b. 30%叶片处截面



c. 50%叶片处截面

d. 70%叶片处截面



a. 10%叶片处截面

b. 15%叶片处截面



c. 20%叶片处截面

d. 30%叶片处截面

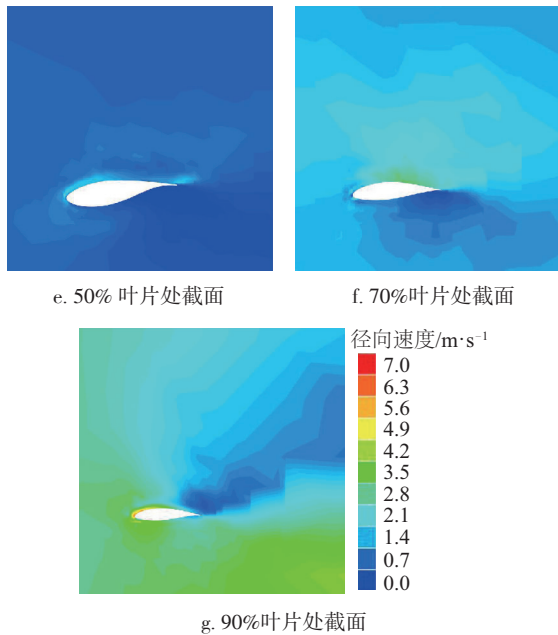


图6 叶片展向不同截面的径向速度云图

Fig. 6 Radial velocity contours of different cross section of blade

### 3.4 尾 流

图7所示为风力机尾流区不同位置处速度的分布。 $S_D$ 表示风力机下游距离风轮旋转平面的距离,其中 $S_D=1D\sim 7D$ ;  $V_D$ 表示 $S_D$ 位置处的速度;  $H_D$ 表示计算域高度方向(图1中 $Y$ 方向)的坐标值与风力机直径的比值,其中风轮旋转中心所在位置为 $H_D=0$ 处,风轮位于 $H_D=-0.5\sim 0.5$ 处。由图7可见,当 $-0.5 < H_D < 0.5$ 时,风穿过风轮能量被大量吸收,风力机近尾流区( $S_D=1D\sim 4D$ )与远尾流区( $S_D=5D\sim 7D$ )的速度均较低,风轮对来流的阻塞作用主要集中在近尾流区。当 $H_D < -0.5$ 和 $H_D > 0.5$ 时,由于风力机近尾流区的速度较低,诱导周围的流体使其速度增大,则 $V_D$ 略大于 $11.4\text{ m/s}$ ;而风力机远尾流区的速度接近来流风速。近尾流区的速度分布呈现两个低速区,位于 $H_D=-0.5$ 、 $H_D=0.5$ 附近,风轮旋转中心的下游速度分布呈一个高速区。随着尾流向下游运动,低速流体的速度先减小后增加,高速流体的速度逐渐减小;当 $S_D=4D$ 时,低速流体与高速流体的速度值接近。远尾流区的速度分布呈一个低速区,且该低速区位于风轮旋转中心的下游。随着尾流向下游运动,与周围自由流体发生动量交换,远尾流区速度逐渐恢复接近来流

风速,如图7中 $S_D$ 分别为 $5D$ 、 $6D$ 和 $7D$ 时的速度分布。

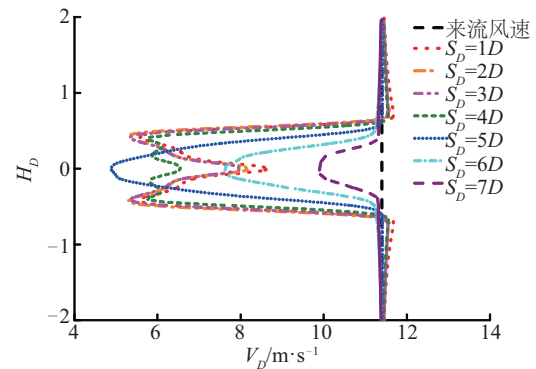
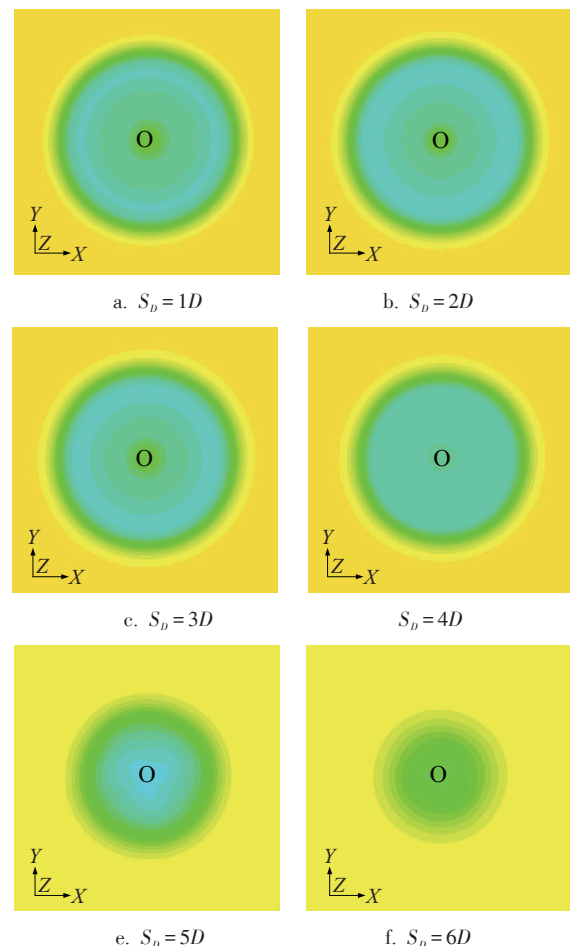


图7 风力机尾流的速度分布

Fig. 7 Velocity distribution of wind turbine wake

图8所示为风力机尾流区不同位置处轴向速度云图,速度的变化范围相同,为 $0\sim 16\text{ m/s}$ 。由图8可见,随着尾流向下游运动与周围流体发生动量交换,尾流低速流体的覆盖面积逐渐减小,尾流区以外周围流场的速度逐渐降低,趋于来流风速。风力





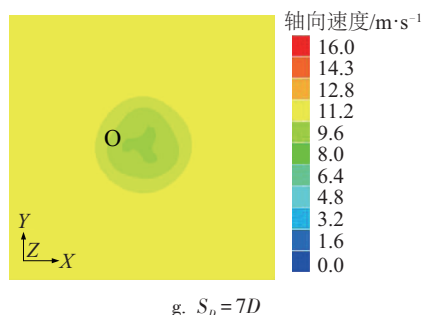


图8 风力机尾流的轴向速度云图

Fig. 8 Axial velocity contours of wind turbine wake

机近尾流区,风轮旋转中心的下游风速稍高,沿着叶片的径向方向,速度先减小后增大,叶尖的下游由于叶稍涡的影响速度最高。风力机远尾流区,风轮旋转中心的下游速度稍小,沿着叶片的径向方向,速度逐渐增大。

### 3.5 湍动能

图9所示为叶片展向不同截面的流场湍动能变化的云图,湍动能的变化范围为  $0 \sim 0.07 \text{ m}^2/\text{s}^2$ 。由图9可见,风穿过风轮湍动能大幅提高,由于机舱后脱落涡的影响,使得流体湍动能增加,如图9a所示。自叶根至叶尖的径向方向,风轮后流体的湍动能逐渐减小,如图9b和图9c所示;机舱附近带有高

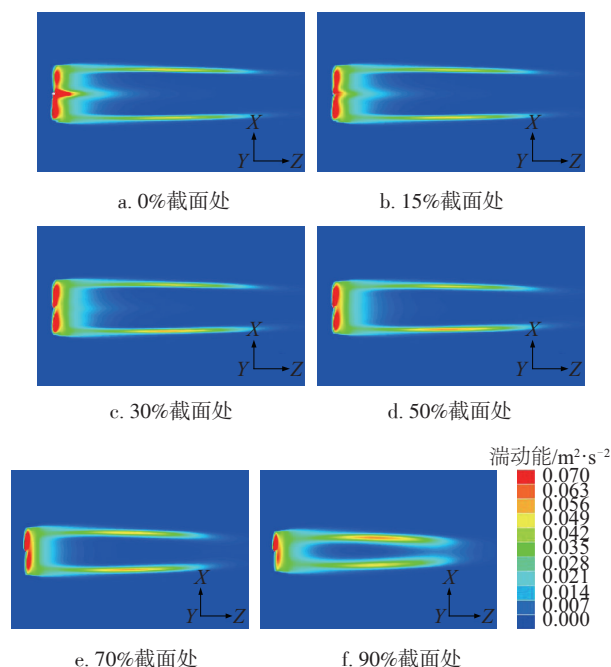


图9 叶片展向不同截面的流场的湍动能云图

Fig. 9 Turbulent energy contours of different cross section flow field of blade

湍动能的流体的影响区域减小,风力机尾流区流体的湍动能减小,且高湍动能流体覆盖的区域亦减小,如图9d和图9e所示。叶尖90%截面处,如图9f所示,受叶稍涡影响,风力机尾流区流体的湍动能增大。

## 4 结 论

本文采用CFD数值模拟方法研究NREL 5 MW风力机的气动特性和尾流场流体的速度以及湍动能的变化规律,主要结论如下:

1)通过将采用CFD方法计算得到的风力机的功率与FAST软件的计算结果进行比较,表明CFD数值模拟方法可较准确计算得到风力机输出功率。

2)叶片展向自叶根至叶尖,吸力面的压力逐渐降低,低压区覆盖面积逐渐增大;压力面的压力逐渐升高,前缘与尾缘附近压力增幅较大。

3)叶根附近吸力面径向速度较大,二次流动显著。

4)风穿过风轮能量被大量吸收,风轮对来流的阻塞作用主要集中在近尾流区。随着尾流向下游运动,与周围自由流体发生动量交换,尾流区速度逐渐恢复接近来流风速。

5)风穿过风轮湍动能大幅提高,自叶根至叶尖的径向方向,风轮后流体的湍动能逐渐减小,风力机尾流区流体的湍动能亦减小。

### [参考文献]

- [1] 李俊峰. 2012中国风电发展报告[R]. 中国资源综合利用协会可再生能源专业委员会, 2012.
- [1] Li Junfeng. 2012 China wind power review and outlook [R]. Chinese Renewable Energy Industries Association (CREIA), 2012.
- [2] The global wind power statistics 2014. Global wind energy council, 2015 global wind statistics 2014[R]. Global Wind Energy Council (GWEC), 2015.
- [3] 赵汀. 我国风电进入“成熟期”新增装机三年平稳增长[R/OL]. [http://www.cpn.com.cn/zdyw/201502/t20150215\\_783680.html](http://www.cpn.com.cn/zdyw/201502/t20150215_783680.html), 2015-02-15.
- [3] Zhao Ting. China wind power into the “mature” new power steady growth in the last three years [R/OL].

- [http://www.cpn.com.cn/zdyw/201502/t20150215\\_783680.html](http://www.cpn.com.cn/zdyw/201502/t20150215_783680.html), 2015-02-15.
- [4] Hand M M. Unsteady aerodynamics experiment phase VI: Wind tunnel test configurations and available data campaigns [R]. NREL/TP-500-29955, National Renewable Energy Laboratory, 2001.
- [5] Wiley J, Sons L T D. The NREL full-scale wind tunnel experiment [J]. Wind Energy, 2002, (5): 77—84.
- [6] Young M P, Chang B H. Numerical simulation of wind turbine scale effects by using CFD [R]. AIAA-2007-216.
- [7] Schepers J G. An engineering model for yawed conditions, developed on basis of wind tunnel measurements [R]. AIAA-99-0039, 1999.
- [8] 贺德馨, 陈 明. 风力机叶片表面压力分布测量 [J]. 气动实验与测量控制, 1990, 4(4): 52—59.
- [8] He Dexin, Chen Ming. Pressure measurements on the blade surface of wind turbine [J]. Aerodynamic Experiment and Measurement & Control, 1990, 4(4): 52—59.
- [9] 朱春建, 胡丹梅, 杜朝辉. 水平轴风力机三维气动特性实验 [J]. 能源技术, 2005, 26(3): 93—96.
- [9] Zhu Chunjian, Hu Danmei, Du Zhaohui. Aerodynamic characteristics experiments on horizontal axis wind turbine [J]. Energy Technology, 2005, 26(3): 93—96.
- [10] Nijssen R. WMC 5 MW laminate lay-out of reference blade for WP3: upwind WMC 5 MW laminate data, Rev. 1 [R]. Knowledge Centre Wind turbine Materials and Constructions, 2007.
- [11] Kooijman H J T, Lindenburg C, Winkelaar D, et al. DOWEC 6 MW pre-design: Aero-elastic modeling of the DOWEC 6 MW pre-design in PHATAS [R]. Energy Research Center of the Netherlands: ECN-CX—01-135, DOWEC 10046\_009, 2003.
- [12] Fulton G R, Malcolm D J, Moroz E. Design of a semi-submersible platform for a 5 MW wind turbine [A]. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit [C], Reno, NV, 2006.
- [13] LM Glasfiber Group. Wind turbine blades, product overview, standard products-max rated power  $\leq 5000$  kW [R/OL]. URL: <http://www.lmglasfiber.dk/UK/Products/Wings/ProductOverview/5000kw.htm>, 2015-01-04.
- [14] Jonkman J M, Butterfield S, Musial W, et al. Definition of a 5 MW reference wind turbine for offshore system development [M]. New York, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO., 2009.
- [15] Brian R R. Definition of a 5 MW/61.5 m wind turbine blade reference model [R]. Sandia National Laboratories: United States Department of Energy by Sandia Corporation, 2013.
- [16] Menter F R, Kuntz M, Langtry R. Ten years of industrial experience with the SST turbulence model [M]. New York: Begell House Inc., 2003.
- [17] 左 薇, 康 顺, 仇永兴, 等. H型风力机气动性能数值分析 [J]. 工程热物理学报, 2013, 34(8): 1462—1465.
- [17] Zuo Wei, Kang Shun, Qiu Yongxing, et al. Numerical simulation of the aerodynamic performance of H type wind turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2013, 34(8): 1462—1465.
- [18] Jonkman B, Jonkman J. ReadMe file for FAST V8.09.00 a-bjj. Golden, CO. [R]. National Renewable Energy Laboratory, 2014.

## NUMERICAL SIMULATION OF AERODYNAMIC PERFORMANCE OF NREL 5 MW WIND TURBINE

Zuo Wei<sup>1</sup>, Li Huimin<sup>1</sup>, Rui Xiaoming<sup>2</sup>, Wang Xiaodong<sup>2</sup>, Kang Shun<sup>2,3</sup>

(1. North China Power Engineering CO., LTD. of China Power Engineering Consulting Group, Beijing 100120, China;

2. Key Laboratory of CMCPPE Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

3. Xi'an Modern Control Technology Research Institute, Xi'an 710065, China)

**Abstract:** The aerodynamic performance of NREL 5 MW wind turbine without tilt angle and cone angle is numerically investigated by using CFD numerical simulation method with SST turbulence model in this paper. The power calculated with different velocities in the condition of uniform speed is compared with the result of FAST software. In addition, pressure distribution and radial velocity flow field of blade at different locations along the blade is analyzed. The variation of velocity and turbulent energy of wind turbine wake flow field is discussed. The results showed that the pressure of the suction surface reduces along the blade from blade root to tip and the low pressure area gradually increases. The pressure of the pressure surface increases and the pressure increase sharply near the leading edge and trailing edge. A large number of wind energy is absorbed by the wind turbine, the wind turbine for coming flow blocking action mainly concentrated in the near wake region. The turbulent energy gradually decreases after the wind turbine with the fluid moving from the near wake to the far wake.

**Keywords:** wind turbine; power; wake; turbulence