

垂直轴风力机流场主动控制方法研究

袁全勇¹, 李 春^{1,2}, 杨 阳¹

(1. 上海理工大学能源与动力工程学院, 上海 200093; 2. 上海市动力工程多相流动与传热重点实验室, 上海 200093)

摘 要: 针对垂直轴风力机叶片攻角连续性变化导致的非稳定流动, 提出一种改善叶片攻角的主动变桨控制方法。首先通过实验验证数值模拟方法的可行性及有效性, 其次对变桨控制前后风力机流场进行二维数值模拟, 得到风力机在不同变桨条件下的气动特性及流场结构, 计算结果表明: 变桨控制可使叶片在不同方位角下处于更合适的攻角, 进而获得较优的气动性能, 变桨控制后的风能利用系数有所增加。随着最大变桨角度的增加, 风能利用系数先增大后减小, 最大可提高33.2%, 同时主动变桨可抑制叶片尾缘流动分离, 使得叶片尾涡耗散轨迹更贴合风轮旋转圆周。从而降低转矩系数波动幅值, 提高风力机运行寿命。

关键词: 垂直轴风力机; 流动控制; 数值模拟; 气动特性

中图分类号: TK83

文献标识码: A

0 引 言

随着能源危机愈加严重, 风力发电日益成为新能源领域中具发展前景的发电方式之一^[1]。风力机作为捕获风能的重要装置按其风轮转轴的位置可分为水平轴和垂直轴2种^[2]。较之于水平轴风力机, 垂直轴风力机具有无需对风偏航、噪声低、结构简单、安全可靠、成本低及维护维修方便等优点^[3]。但其叶片攻角连续变化将导致许多复杂的非稳定流动, 这类非定常流动不仅会导致叶片吸力面发生流动分离并生成负作用涡, 而且会引起气动载荷大幅波动^[4,5]。此外, 上风区叶片产生的尾迹与风轮转轴脱落涡相互干涉, 进一步加强了气流的非线性流动, 干扰下风区叶片风能吸收。且固有的非定常流场特征是垂直轴风力机自启动性能差、气动载荷波动大和风能利用率偏低的主要原因。因此, 寻找一种适用于垂直轴风力机的高效流动控制方法对于改善其气动性能、提高市场竞争力具有重要意义^[6]。为此, 许多学者对此进行了大量相关研究。

丹麦 Bak 等^[7]对带有尾缘襟翼的 Risø-B1-18 翼型进行风洞实验, 结果表明主动控制尾缘襟翼可有效降低80%的升力系数幅值。李 春等^[8,9]在国内

较早地开展了垂直轴风力机襟翼控制研究, 通过分析不同尖速比下旋转周期内叶片攻角变化规律, 基于叶尖速比和风轮半径等参数提出2种襟翼主动控制的数学模型, 并通过数值计算进行验证, 结果表明: 2种控制方法均能有效改善风轮旋转域的涡量分布, 风轮转轴周期性脱落涡对下风区叶片的干涉作用减弱。风轮转矩系数波幅降低近50%, 对周期性波动载荷的控制效果明显。但襟翼控制未能有效提高风能利用率且耗能较大。

Schonborn 等^[10]通过液压装置对垂直轴水轮机进行正弦规律的变桨控制, 通过理论计算发现, 风能利用系数可在尖速比为3时提高至最大0.38。Paraschivoiu 等^[11]基于多流管理论和遗传算法, 优化设计叶片旋转周期内的桨距角变化规律, 优化变桨规律后的垂直轴风力机年发电量提高了近30%。Elkhoury 等^[12]通过实验和数值模拟研究了不同翼型的定桨和变桨垂直轴风力机多个工况下的气动性能, 结果表明, 变桨有助于提高风能利用率。Hwang 等^[13,14]对 Cycloturbine 的摆线规律进行了数值模拟, 同时提出新的变桨规律, 风能利用率提高近25%。文献[15]基于叶素动量理论计算叶片在不同桨距角下旋转周期内对应的气动性能, 得到并

收稿日期: 2016-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(51676131); 上海市科学技术委员会项目(13DZ2260900)

通信作者: 李 春(1963—), 男, 博士、教授、博士生导师。主要从事计算流体力学、叶轮机械气动力学、能源规划及风能利用等方面的研究。lichunust@163.com

验证了各方位角对应的最佳桨距角,结果表明有效力矩提高了近 1 倍。文献[16]设计了一种新型变桨机构,并对桨距角曲线为正弦曲线的变桨垂直轴风力机进行运动仿真及载荷分析,改善了垂直轴风力机的气动性能,提高了输出功率。

以上表明襟翼控制虽能抑制尾涡的产生及降低叶片载荷,但不能很好地提高风能利用率且襟翼控制耗能较大。而叶片主动变桨可有效提高垂直轴风力机气动效率。仍需深入分析风轮旋转过程中绕流场动态变化,从流动机理上研究流场与气动力之间的关系。为此,本文提出一种新的主动变桨控制方法,对垂直轴风力机在变桨控制下进行数值模拟,并对其变桨前后气动特性及流场结构进行对比分析,通过在不同方位角下改变叶片桨距角,来改善垂直轴风力机气动特性及流场特性,可为垂直轴风力机的研发及风能的高效利用奠定理论基础。

1 计算对象及网格划分

1.1 垂直风力机二维几何模型

以三叶片 H 型垂直轴风力机为研究对象,风轮半径为 6 m,其叶片使用经典 NACA 0012 对称翼型,弦长为 0.5 m,二维风轮俯视示意图如图 1,并设置水平来流为稳态风 V_∞ ,风速为 10 m/s,尖速比为 4,风力机基本参数如表 1 所示。

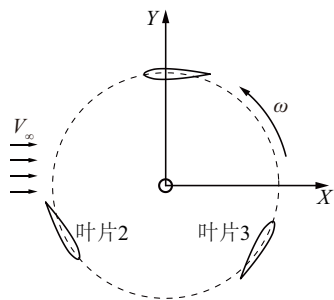


图1 二维风轮俯视示意图

Fig. 1 Schematic diagram of two dimensional wind wheel

表1 三叶片垂直轴风力机基本参数

Table 1 Basic parameters of vertical axis wind turbine

参数	数值	参数	数值
实度	0.25	垂直轴风力机类型	H 型
风轮半径/m	6	叶片翼型	NACA 0012
叶片弦长/m	0.5	来流速度/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	10
叶片数量/个	3	尖速比	4

1.2 计算域及网格划分

计算域及边界条件如图 2 所示,将整个计算域划分为 4 个子区域,分别为内流域(区域 1)、主旋转域(区域 2)、叶片控制域(区域 3)以及外流域(区域 4),4 个流域之间均设置为 interface 边界(虚线表示)进行数据传输。计算域以风轮转轴 O 为中心划分成经典 C 型计算域($ABCEF$), D 为风轮直径,上游来流区(半圆 AF)为 5 倍风轮直径,下游尾迹区(正方形 $ABEF$)是边长为 10 倍风轮直径的正方形区域,以保证尾迹充分发展。整体上下边界 AB 、 EF 以及前端 AF 均设置为速度进口 (Velocity Inlet);后端边界 BD 设置为压力出口 (Pressure Outlet);叶片部分设置为无滑移壁面,湍流粘性模型选择 S-A 模型,流体介质为空气,密度 $\rho=1.225 \text{ kg/m}^3$,动力粘度 $\mu=1.7894\times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$,来流速度 $V_\infty=10 \text{ m/s}$,方向如图 2 所示。

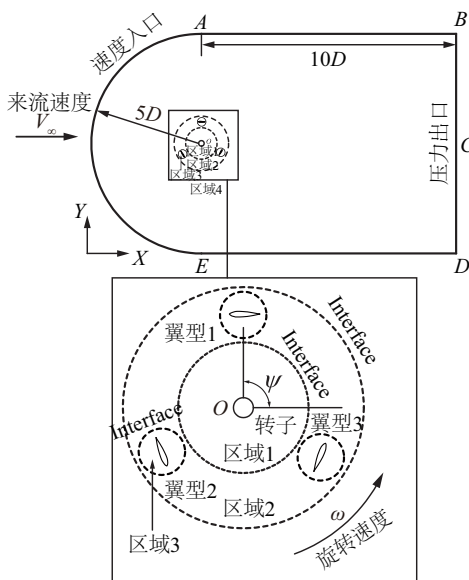


图2 计算域及边界条件

Fig. 2 Computational domain and boundary conditions

进行网格划分时,风轮附近计算域及叶片附近局部放大图如图 3 所示。由于变桨控制需应用滑移网格,故计算域网格划分采用非结构网格进行拓扑,并对叶片和转轴周围的流动参数变化剧烈区域进行网格局部加密。为提高计算时网格质量及缩短计算时间,在 3 个叶片周围分别布置 3 倍弦长的叶片控制域(区域 3),使网格旋转与重构仅发生在叶片控制域中,极大地缩短了计算时间并提高计算精度。

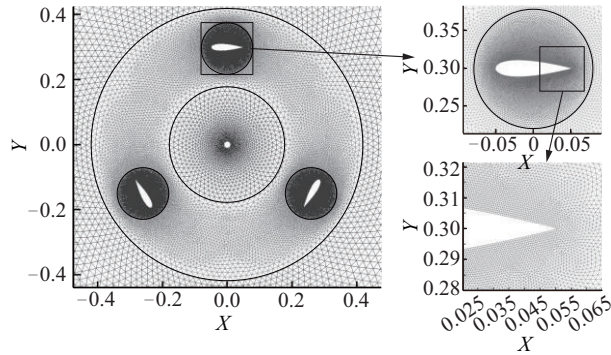


图3 计算网格及局部放大图

Fig. 3 Computational grid and local magnification

为更准确模拟叶片表面、前后缘处的流场情况,对这些区域网格进行局部加密。近壁面网格(即首层边界层尺度)为 10^{-4} mm。

2 有效性验证

为验证所提方法的有效性及其可行性,首先需进行网格无关性验证,参照谢菲尔德大学风洞实验垂直轴风力机模型及实验数据^[3]生成5套数量分别为15.4万、35.6万、55.0万、74.8万及102.5万的非结构网格,对比不同网格数量下整机转矩系数。通过计算,获得网格数量与转矩系数的关系如图4所示。由图4可知,当网格数量为15.4万时,垂直轴风力机整机转矩系数平均值 $C_m=0.099$,而当网格数量增加到55.0万以上时,风力机的转矩系数趋于稳定,维持在0.109附近。当网格数量大于55.0万时,平均转矩系数随网格数量增加几乎保持不变。鉴于此,本文设置首层边界层尺度为 10^{-4} m且总数为55.0万的网格可满足计算精度要求。

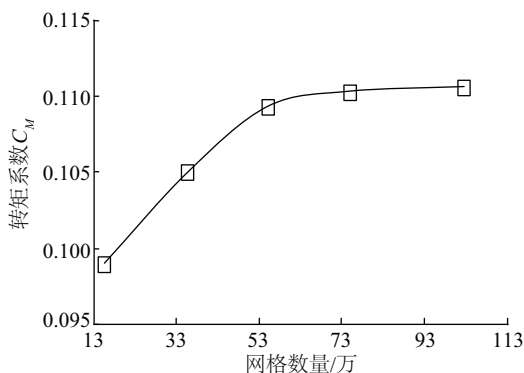


图4 网格无关性验证

Fig. 4 Grid independence verification

确定网格数量及边界层网格尺度后,通过与实

验对比进行准确性及可行性验证。根据相对应的实验工况,计算来流风速为5.07 m/s ($Re=34000$),尖速比分别为2.15、2.28、2.40及2.57这4个工况下的垂直轴风力机的气动性能,与实验值对比结果如图5所示。

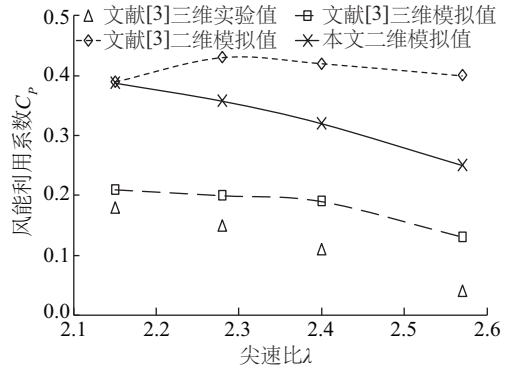


图5 风能利用系数模拟值与实验值对比

Fig. 5 Comparison of simulated and experimental values of wind energy utilization coefficient

由图5可知,模拟结果与实验值之间存在一定差异,产生误差的原因是由于二维CFD数值模拟不包括存在于真实风力机和三维模拟中的叶尖损失的影响,虽有一定误差,但其变化趋势与实验值完全吻合。当尖速比较低时,模拟值与文献的二维模拟值几乎一致;当尖速比增大,本文数值模拟结果较文献[3]中的二维模拟值更贴近实验值,说明网格划分及计算方法较合适,能够准确模拟出垂直轴风力机的气动性能及流场情况。

3 结果与分析

3.1 变桨控制原理

图6为变桨控制原理示意图。由叶片的气动特性可知,当攻角的变化超过失速点后,升力系数下降,阻力系数迅速增加,将会影响到垂直轴风力机

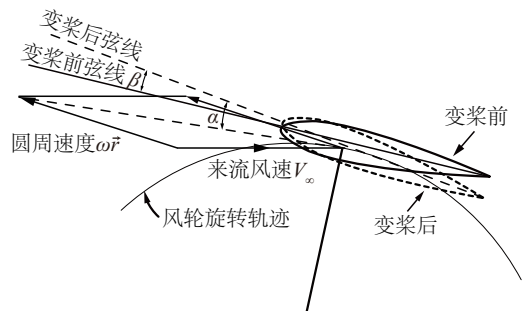


图6 变桨控制原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of variable pitch control principle

的气动性能,甚至产生反力矩。因此,提高垂直轴风力机的气动性能,首先应使叶片攻角的变化在合理范围内,以获得较大的转动力矩,叶片绕自身气动中心顺时针旋转,使攻角向有利于提升风力机气动特性的方向变化,以避免产生相反力矩。

3.2 变桨控制规律

为研究桨距角对垂直轴风力机整体气动性能的影响并寻找最佳变桨控制规律,应用 CFD 方法对垂直轴风力机的流场及气动力进行分析。当风力机尖速比 λ 给定情况下,叶片攻角 α 是方位角 ψ 的函数,其关系式为:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\cos \psi}{\lambda + \sin \psi} \right) \quad (1)$$

根据式(1)风力机叶片攻角与方位角关系提出控制方程如式(2)所示,称其为变桨控制规律,而以此为基础的 CFD 计算通过 UDF 编程实现。

$$\beta = -\frac{5}{18} k_1 \left[\tan^{-1} \left(\frac{\cos \psi}{\lambda + \sin \psi} \right) \right] \quad (2)$$

式中, β ——攻角变化量。

将 $\psi = \omega t$ 代入式(2)并对时间 t 求导,得:

$$\beta' = -\frac{5}{18} k_1 \frac{\omega [1 + 4 \sin(\omega t)]}{17 + 8 \sin(\omega t)} \quad (3)$$

式中, k_1 ——最大变桨角度,如当 $k_1 = 3$,表示最大变桨幅度可达 $\pm 3^\circ$ 。

攻角变化量 β 与方位角 ψ 存在一定函数关系,如变桨控制方程(2)所示,3个叶片采用同一个变桨规律,在数值模拟过程中,3个叶片分别由3个UDF控制,来进行变桨,以实现攻角随方位角的变化而变化。通过控制方程的约束,每个叶片在同一方位角下,攻角相同;而同一时刻(3个叶片方位角不同),3个叶片攻角不同。

3.3 气动特性

由变桨控制方程可知,最大变桨角度 k_1 是影响垂直轴风力机气动特性的重要因素,本文分别对 k_1 为 1.5° 、 3.0° 、 4.5° 及 6.0° 共4种工况进行数值模拟,以期获得最佳 k_1 使风力机获得最大输出功率。

3.3.1 变桨控制对气动特性的影响

图7给出了在4种变桨工况下,风能利用系数与最大变桨角度之间的关系,计算结果发现变桨控制下的风能利用率均较定桨风力机有所提升,定桨风力机风能利用率为0.30,当最大变桨角度为 1.5° 、

3.0° 、 4.5° 及 6.0° 时,风能利用系数分别提高19.6%、33.2%、30.9%、17.3%。随变桨角度的增大,风能利用系数先增大后减小,风能利用系数最大值出现在 $k_1 = 3.0^\circ$ 时,此时 $C_p = 0.40$ 。这说明变桨角度并非越大越好,而是存在一个最佳变桨角度 k_1 。此外,当 k_1 为 1.5° 和 6.0° 时,提高风能利用系数的效果几乎相同,因此,实际运行时,若想要提高相同幅度的风能利用系数,应选择较小的 k_1 ,较小的变桨规律一方面可减少控制机构所消耗的功率,同时可减小由于叶片自身俯仰而引起的动态失速效应。

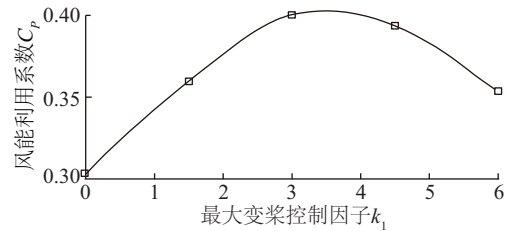


图7 不同工况下的风能利用系数 C_p

Fig. 7 Wind energy utilization coefficient C_p under different working conditions

3.3.2 变桨控制对 C_L 的影响

在所选4种工况中,选择 k_1 为 3.0° 及 6.0° 这2种变桨工况,对比分析变桨前后单叶片升力系数 C_L 随方位角的变化关系,结果如图8所示。当 $k_1 = 3.0$ 时,其升力系数曲线高于定桨风力机,在相同攻角下叶片获得了更大的升力系数,但当 k_1 增大到 6.0 时,其升力系数曲线仅在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 方位角略高于定桨风力机,其他方位角下均变差了,甚至导致平均升力系数低于定桨风力机。

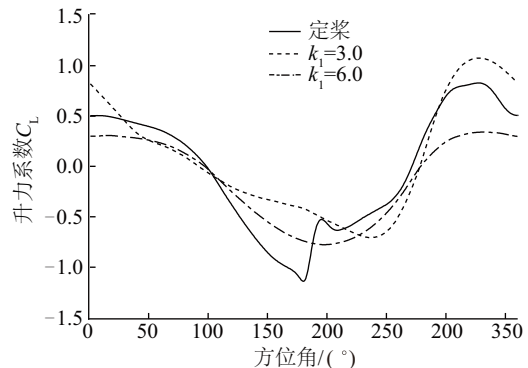


图8 变桨控制下单叶片动态升力系数与方位角变化关系

Fig. 8 Relationship between dynamic lift coefficient and azimuth angle of single blade under variable pitch control

3.3.3 变桨控制对 C_m 的影响

以上研究表明,变桨存在最佳控制因子 k_1' ,且最佳变桨控制角度 $k_1'=3^\circ$ 。分别对定桨及最佳变桨控制规律($k_1'=3^\circ$)2种工况在不同方位角下的整机转矩系数进行对比分析,结果如图9所示。

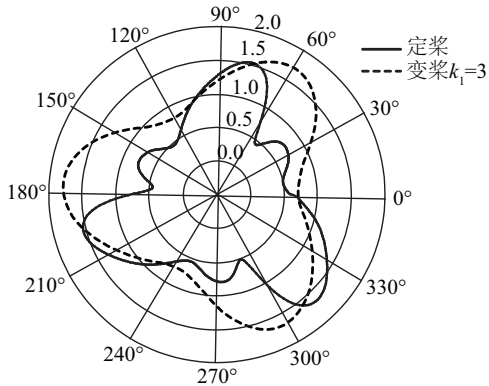


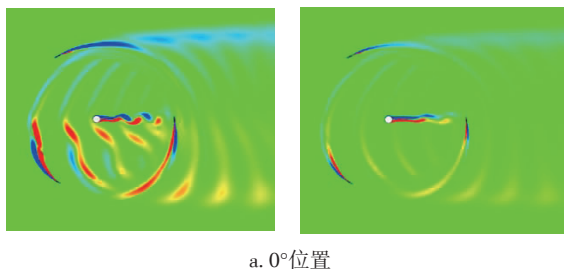
图9 变桨控制前后各方位角下整机转矩系数对比

Fig. 9 Comparison of torque coefficient of each azimuth angle with and without variable pitch control

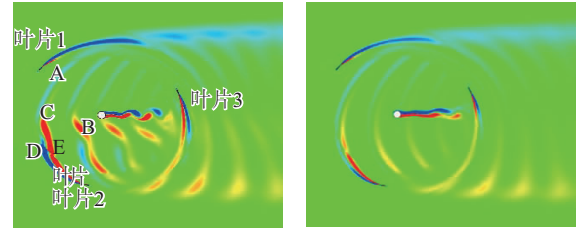
由图9,对比定桨及最佳变桨角度 $k_1'=3^\circ$ 条件下整机转矩系数可知,风力机叶片变桨控制后转矩系数在部分方位角下均高于定桨风力机,最大转矩系数出现在 55° 位置,为 1.78,较定桨风力机高 8.1%,同时最小转矩系数为 0.71,较定桨风力机高 43.2%,最终变桨控制后整机平均转矩系数为 1.21,较定桨提高 32.3%。有效降低了整机转矩幅值及疲劳载荷。

3.4 流场特性

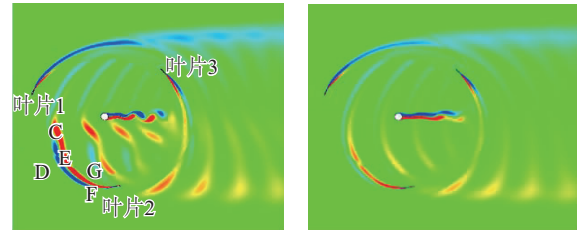
选择最佳变桨控制角度 $k_1'=3^\circ$ 及定桨 2 种工况,进行流场特性分析。图 10 为 2 种不同工况下,垂直轴风力机在不同位置时的流场特性对比图,左边为定桨工况流场情况,右边为 $k_1'=3^\circ$ 变桨工况流场情况。由图可清晰观察到一个周期内失速涡的发展、脱落及耗散过程。以 20° 为间隔来清晰地显示风轮区域尾涡的发展情况。



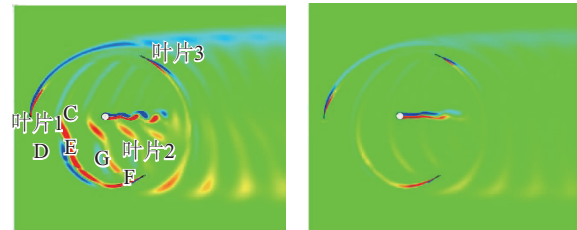
a. 0° 位置



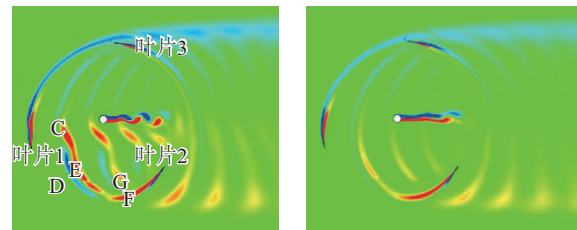
b. 20° 位置



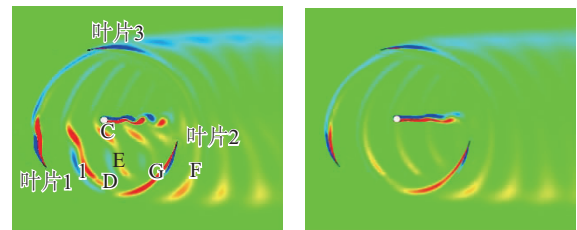
c. 40° 位置



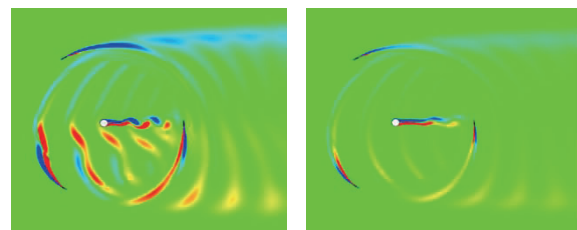
d. 60° 位置



e. 80° 位置



f. 100° 位置



g. 120° 位置

图10 有无变桨控制时不同位置尾涡发展情况

Fig. 10 Trailing vortex development at different position with and without variable pitch control

由图 10 可知,当风力机由 0° 旋转至 20° 位置时,定桨风力机 3 个叶片均产生较大的分离涡和脱落涡,如叶片 2 已在尾部生成了 2 个较大的分离涡 D 和 E,及一个正在脱落的涡 C,而变桨控制风力机后方没有产生大分离涡且无大脱落涡产生。当风力机从 20° 转到 100° 时,定桨风力机中叶片上的涡持续生长又脱落并产生新的涡,如涡区 F、G 及 H,脱落的漩涡 C 在流场中继续向下游运动耗散,变桨风力机的叶片上均只有两道尾涡,可见变桨控制有效抑制了尾涡的生成。因三叶片风力机叶片夹角为 120° ,当叶片转到 120° 时,整个流场结构又进入下一个循环周期,与转矩系数周期性变化结果一致。

4 结 论

以三叶片垂直轴风力机为研究对象,根据叶片静态攻角变化规律,提出减少动态失速的变桨控制规律,采用 CFD 方法分别对变桨控制前后的垂直轴风力机流场进行数值模拟,研究所提变桨控制规律改善了垂直轴风力机气动特性及流场特性,主要得出以下结论:

1) 变桨控制可使叶片在不同方位角下处于更合适的攻角,进而获得较优的转矩系数和气动性能。

2) 变桨控制可有效降低转矩系数波动幅值并提高其平均值,有效降低了疲劳载荷;随着最大变桨角度的增大,风能利用系数先增大后减小,最大变桨角度为 3° 时,风能利用系数提高 33.2%。

3) 变桨控制在各方位角下均可有效抑制叶片尾缘流动分离,有效减少了上游分离涡,使得流场涡量分布更均匀。

参考文献

- [1] Han Chenxi, Zhang Sihan. New energy power generation-wind power generation[J]. Journal of Energy & Power Engineering, 2009, 3(9): 45—48.
- [2] Danao L A, Edwards J, Eboibi O, et al. A numerical investigation into the influence of unsteady wind on the performance and aerodynamics of a vertical axis wind turbine[J]. Applied Energy, 2014, 116(3): 111—124.
- [3] Howell R, Qin N, Edwards J, et al. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine[J]. Renewable Energy, 2010, 35(2): 412—422.
- [4] 李 春, 叶 舟, 高 伟, 等. 现代大型风力机设计原理[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.
- [4] Li Chun, Ye Zhou, Gao Wei, et al. Modern large-scale wind turbine design principle [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2013.
- [5] 李 春, 叶 舟, 高 伟, 等. 垂直轴风力机原理与设计[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 2013.
- [5] Li Chun, Ye Zhou, Gao Wei, et al. Wind turbine design with emphasis on darrieus concept [M]. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 2013.
- [6] Baker J R. Features to aid or enable self-starting of fixed pitch low solidity vertical axis wind turbines[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 1983, 15(1-3): 369—380.
- [7] Bak C, Gaunaa M, Andersen P B, et al. Wind tunnel test on airfoil Risø-B1-18 with an active trailing edge flap [J]. Wind Energy, 2010, 13(2-3): 207—219.
- [8] 聂佳斌, 李 春, 祖红亚. 垂直轴风力机翼型动态气动性能研究[J]. 机械研究与应用, 2013, 26(3): 40—47.
- [8] Nie Jiabin, Li Chun, Zu Hongya. The dynamic aerodynamic analysis of airfoil for vertical axis wind turbine[J]. Mechanical Research & Application, 2013, 26(3): 40—47.
- [9] 祖红亚, 李 春, 叶 舟, 等. 垂直轴风力机动态流场及其气动性能分析[J]. 能源研究与信息, 2014, 36(2): 199—203.
- [9] Zu Hongya, Li Chun, Ye Zhou. Aerodynamic performance analysis and dynamic flow filed of vertical axis wind turbine[J]. Energy Research and Information, 2014, 36(2): 199—203.
- [10] Schönborn A, Chantzidakis M. Development of a hydraulic control mechanism for cyclic pitch marine current turbines[J]. Renewable Energy, 2007, 32(4): 662—679.
- [11] Paraschivoiu I, Trifu O, Saeed F. H-Darrieus wind turbine with blade pitch control[J]. International Journal of Rotating Machinery, 2009, 36(4): 7—16.
- [12] Elkhoury M, Kiwata T, Aoun E. Experimental and numerical investigation of a three-dimensional vertical-axis wind turbine with variable-pitch[J]. Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics, 2015, 139(6): 111—123.
- [13] Hwang In-Seong, Lee Yun-Han, Kim Seung-Jo. Effectiveness enhancement of a cycloidal wind turbine

- by individual active control of blade motion [A]. Active and Passive Smart Structures and Integrated Systems 2007 [C], New York, USA, 2007: 19—22.
- [14] Hwang In-Seong, Lee Yun-Han, Kim Seung-Jo. Optimization of cycloidal water turbine and the performance improvement by individual blade control [J]. Applied Energy, 2009, 86(9): 1532—1540.
- [15] 张立勋, 王 康, 张 松, 等. 立轴风力机变桨距控制规律研究 [J]. 太阳能学报, 2012, 36(5): 732—737.
- [15] Zhang Lixun, Wang Kang, Zhang Song, et al. Research of variable-pitch control rule for vertical-axis wind turbine [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 36(5): 732—737.
- [16] 梁小艳, 郭建伟, 芮晓明. 垂直轴风力机变桨矩方式研究 [J]. 中国电力教育, 2007, 12(2): 110—112.
- [16] Liang Xiaoyan, Guo Jianwei, Rui Xiaoming. Research on the torque mode of the vertical axis wind turbine [J]. China Electric Power education, 2007, 12(2): 110—112.

RESEARCH ON ACTIVE FLOW CONTROL METHOD FOR VERTICAL AXIS WIND TURBINE

Yuan Quanyong¹, Li Chun^{1,2}, Yang Yang¹

(1. Energy and Power Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Multiphase Flow and Heat Transfer in Power Engineering, Shanghai 200093, China)

Abstract: An active variable pitch control method is proposed to improve the instable flow caused by the continuous variation of the angle of attack for vertical axis wind turbines. First of all, the feasibility and effectiveness of the numerical simulation method have been validated by the experiment results. Afterwards, the two-dimensional flow fields of the wind turbine with and without pitch control have been simulated in order to obtain the aerodynamic performance and flow field structures of the wind turbine under different pitch conditions. Numerical results indicated that the pitch control leads to a more appropriate variation of angle of attack at different azimuth angles resulting in a better aerodynamic performance. Wind energy utilization coefficient with pitch control has been increased, and with the increase of the maximum pitch angle, wind energy utilization coefficient increases firstly and then decreases. The maximum wind energy utilization coefficient could be improved the 33.2%. Meanwhile, the active pitch could eliminate the flow separation at trailing edge of the blade, blade vortex dissipation trajectory fits the wind wheel to rotate circumference better. In addition, the fluctuation of torque coefficient amplitude has been decreased leading to a longer operating life of the wind turbine.

Keywords: vertical axis wind turbine; flow control; numerical simulation; aerodynamic characteristics