

李争, 齐伟强, 孙鹤旭. 分布式能源用垂直轴风力机气动特性的对比分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2019, 34(4): 74-82. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.011

Li Z, Qi W Q, Sun H X. Comparison and Analysis of Aerodynamic Characteristics of Vertical Axis Wind Turbines for Distributed Energy Sources Applications[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2019, 34(4): 74-82. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2019.04.011

分布式能源用垂直轴风力机气动特性的对比分析

李争*, 齐伟强, 孙鹤旭

(河北科技大学 电气工程学院, 河北 石家庄 050018)

摘要: 为便于分析现有不同结构风力机性能特点, 建立3种结构垂直轴风力机模型. 基于 ANSYS Workbench 中流场计算模块 CFX 分别对3种模型进行流场仿真分析, 从不同的方面对比了3种风力机模型的流场特性差异. 对3种机型的受力分析, 得出阻力与升力随叶尖速比变化的对比关系以及风轮放置形式对升力与阻力的影响. 通过风力机参数研究, 得出3种机型的风能利用系数与转矩系数曲线, 并对3种机型的这2种参数曲线做了对比. 此外, 还分析和对比了3种风力机不同位置处的相对流速和压强分布规律, 提出了 Jensen 尾流模型的压强表述. 总之, 该研究成果能为分布式能源用垂直轴风力机的优化设计和对比提供了借鉴和参考.

关键词: 分布式能源; 垂直轴风力机; 气动特性; 对比分析; CFD

中图分类号: TM315 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-9102(2019)04-0074-09

Comparison and Analysis of Aerodynamic Characteristics of Vertical Axis Wind Turbines for Distributed Energy Sources Applications

Li Zheng, Qi Weiqiang, Sun Hexu

(School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China)

Abstract: By building three models of vertical axis wind turbine (VAWT), the calculation and analysis of three models were implemented by using ANSYS CFX flow field modules. The differences between the three wind turbine models were compared in different ways. Through force analysis of the three models, the changes of forces with the tip speed ratio were obtained, and the corresponding relationships between the lift and drag forces were determined, the effects of turbine placement forms on the lift and drag forces were also defined. Based on the study of the VAWTs parameters, the wind energy utilization coefficient and torque coefficient curve of three kinds of VAWTs were obtained and the comparison between two curves was made. In addition, the relative velocity and pressure of the VAWTs at different positions were analyzed and compared, the pressure expression of Jensen wake model was presented. In a word, the research results provide the reference for the optimum design and contrast of VAWTs for distributed energy sources applications in the future.

Keywords: distributed energy sources; VAWT; aerodynamic characteristics; comparison Analysis; CFD

收稿日期: 2018-02-04

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51577048; 51877070); 河北省自然科学基金资助项目(E2018208155); 河北省高等学校科学技术研究重点项目资助(ZD2018228)

* 通信作者, E-mail: Lzhfgd@163.com

近年来,由于石化能源等不可再生能源的锐减和环境污染问题的日益突出,可再生清洁能源逐渐被提上日程.风能是当之无愧的清洁能源之一,取之不尽,用之不竭,占有量大,在我们的日常生活中几乎随处可见,属于分布式能源.为了将清洁的分布式能源应用于日常的生活和生产中,分布式能源系统应运而生,它是其他形式能源转化为电能的媒介.本文主要研究一种风力发电领域的分布式系统——Senegal式垂直轴风力机.常见的风力机多种多样,有大型、中型和小型,还有定桨距和变桨距风力机等.此外,按驱动原理,可以将风力机分为升力型和阻力型,升力型风力机的风轮旋转是由叶片所受的升力引起的,而阻力型风力机的风轮旋转是由于风对叶片的推力引起的;按风轮轴与来流风向的位置关系,可将风力机分为水平轴和垂直轴风力机,垂直轴风力机的风轮转轴与来流方向垂直,水平轴风力机的风轮转轴与来流方向平行.由于水平轴风力机的研究起步早,许多理论相对成熟且已成经典.因此,近些年国内外不少专家和学者已将目光转向了垂直轴风力机的研究上来.李岩等^[1-2]研究设计了一种 Savonius 风轮与直线翼垂直轴风轮相组合构成的组合型垂直轴风力机,并对直径比进行优化,大大改善了风力机起动和运行性能;Dabiri J O 等^[3]通过改变垂直轴风力机风场布局方式,使相邻两风力机反向旋转,这样在产生相同的功率条件下,与现有的水平轴风力机相比节省了土地的占有面积,布局方式改变后,单机容量变低,成本费用等随之降低;Bhalla R 等^[4]对垂直轴风力机的雷达信号进行了仿真分析,得到了风力发电机的散射特征,最后验证了仿真结果的可行性;王莹等^[5]研究了一种螺旋升力型垂直轴风力机,通过计算流体力学仿真,得出该风力机具有较好的气动性能和起动性能.文献[1-5]经不同的优化设计后,使垂直轴风力机性能得到提高,属于纵向研究,没有对风力机的性能进行横向对比研究. Albuquerque I M 等^[6]研究了水平轴、垂直轴等几种常见风力机机型,并对比了风能利用系数随叶尖速比的关系,属于横向研究,但是研究参数较少,不能全面反应风力机的基本性能;Parker M A 等^[7]主要研究了风力机的功率电子寿命,通过水平轴与垂直轴的对比,得出垂直轴风力机的功率电子寿命低于水平轴,并且增加并联开关器件可以提高垂直轴风力机的功率电子寿命,虽然属于横向研究,但它主要从风力机的控制入手,没有从流体动力学角度分析风力机参数的差异.

本文研究了当风力机尺寸在相同数量级下,通过对比3种机型的气动性能,得出了风力机参数、风轮受力及其流场分布随机型的变化趋势,对垂直轴风力机的深入对比研究具有一定的借鉴意义.

1 垂直轴风力机模型描述

所建立的3种风力机的模型如图1所示,其中风轮高4.5 m,塔架高5 m.图1a中结构一为风轮垂直放置的阻力型垂直轴风力机,只有一个风轮;结构二为风轮水平放置的阻力型垂直轴风力机,具有左右两个风轮,风轮结构与结构一相同;结构三为风轮垂直放置的升力型直翼垂直轴风力机.其中前2种结构为 Senegal(塞内加尔)式结构,属于本课题组研究重点,也是本课题组的研究成果,第3种为 Darrieus(达里厄)式结构,属于常见结构或经典结构.通过 Senegal 式结构与 Darrieus 式结构的量化对比,验证本设计结构的合理性,为新型垂直轴风力机设计提供更加准确和深入的参考.图1b中分别为结构一风轮的俯视图、结构二的左视图和结构三的俯视图,其中风轮直径 D 设定为 2 m.从图1b中能清楚地看出风力机的叶片结构,结构一和结构二为半圆板加直板,结构三为流线型四叶片^[8-11].

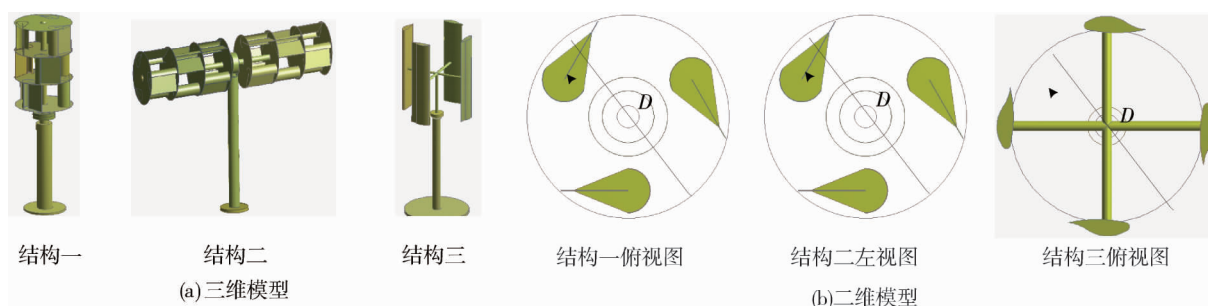


图1 3种风力机模型

2 风力机的理论分析

2.1 数值模拟方法

风力机数值计算过程在 ANSYS CFX 中完成,基于可压缩的连续方程和雷诺平均 N-S 方程,设定旋转域的旋转角速度,采用二阶迎风后插方法对整个计算域进行稳态模拟.湍流模型选取剪切应力运输模型(SST).该模型是 $k-\varepsilon$ 模型和 $k-\omega$ 模型的结合体,充分利用 $k-\omega$ 模型在低雷诺数时不需要壁面函数的优势,而在主流区采用标准 $k-\varepsilon$ 模型,避免了 $k-\omega$ 模型对来流的敏感性^[12-15].

计算边界条件设定:在静止域中设置速度入口,零压力出口,对称和壁面边界;在旋转域中设置叶片为无滑移壁面边界;静止域与旋转域的交界处设为交界面.

2.2 风力机的基本参数

1) 叶尖速比 λ . λ 定义为风轮叶尖线速度与风流速度之比,相当于风力机的指南针.其表达式为

$$\lambda = \frac{R\omega}{v}. \quad (1)$$

式中: R 为叶轮的半径, m ; ω 为风轮角速度, rad/s ; v 为风流速度, m/s .

2) 风能利用系数 C_p . C_p 又称为风力机的转换效率,其表达式为

$$C_p = \frac{2T\omega}{\rho Av^3}. \quad (2)$$

式中: T 为风力机转矩, $N \cdot m$; ρ 为空气密度,取 1.185 kg/m^3 ; A 为风力机的扫掠面积, m^2 .

3) 转矩系数 C_t .

$$C_t = \frac{2T}{\rho DA v^2}. \quad (3)$$

式中: D 为风轮直径, m .

2.3 升力 F_L 和阻力 F_d

当风流经风力机风轮时,必然会产生力的作用,使风轮转动.风轮在旋转过程中主要受离心力、空气动力作用,而离心力对风轮转速和风轮质量等参数影响较大,而当风轮转速和质量确定后,离心力基本为一恒定值,为此,此处主要考虑空气动力作用.风流经任何物体时,都将产生力 F ,经受力分解,将该力分解为阻力 F_d 和升力 F_L ,如图 2 所示.阻力 F_d 平行于来流方向,升力 F_L 垂直于来流方向^[16].

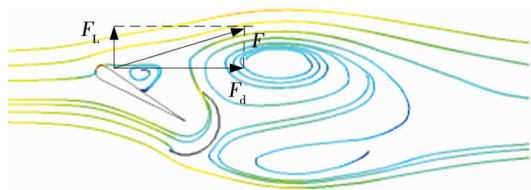


图 2 叶片的受力分解

其升力、阻力和合力的表达式如式(4)~式(6).

$$F_L = \frac{1}{2} c_l \rho A v^3; \quad (4)$$

$$F_d = \frac{1}{2} c_d \rho A v^3; \quad (5)$$

$$F = \frac{1}{2} c \rho A v^3. \quad (6)$$

式中: c_l 为升力系数; ρ 为空气密度; c_d 为阻力系数; c 为总受力系数.

3 计算结果与分析

3.1 3种机型风轮的受力对比

如前所述,叶片在风场中的受力分解后得到升力与阻力.此处设定风流速度 $v=9 \text{ m/s}$,经流体力学仿真计算,得到各机型风轮的升力与阻力随叶尖速比 λ 的对比结果,如图 3 所示.图 3 横向对比了 3 种机型

受力情况,从图3中可以看出:风力机的风轮垂直放置的结构一与水平放置的结构二升力与阻力的变化趋势基本相同,它们的阻力随叶尖速比先增加后减小,而前者变化范围在400~500 N,后者在800~1 000 N,数值上相差一半的原因是后者为双风轮结构,它们的升力随叶尖速比增大而增大,且叶尖速比小时增大平缓,叶尖速比大时增大急,数值上较阻力小很多,因此结构一和结构二为阻力型;结构三的升力与阻力的变化规律与趋势和前两者有所不同,升力随叶尖速比增加而增加,阻力随叶尖速比增加改变方向,其升力与阻力的变化规律和叶片在流场的位置有关。

图3中受力分布规律的原因:前2种为典型的Senegal式垂直轴风力机属于阻力型,第3种为直翼升力型垂直轴风力机为典型的Darrieus式结构属于升力型。一般而言,阻力型风力机的叶尖速比 λ 小于升力型结构,前2种风力机在叶尖速比为0.5左右,风能利用系数最高,风轮在风场中受到的推力也最大,存在最大值。实际上第3种结构的风力机也存在最大推力,只是在叶尖速比远大于1的地方。由于前2种为阻力型,升力比阻力小很多,尤其是在转速很低时升力更小,随着叶尖速比的增加,升力也有所增加,但由于阻力型风力机受空气阻尼作用的影响,转速不能升得很高,升力也不会增加太大,升力所占的比重也很小。而结构三的升力在此看似很小的原因是本文只是对较低转速时进行了模拟,随叶尖速比的增加超过1,升力会占主要比重。

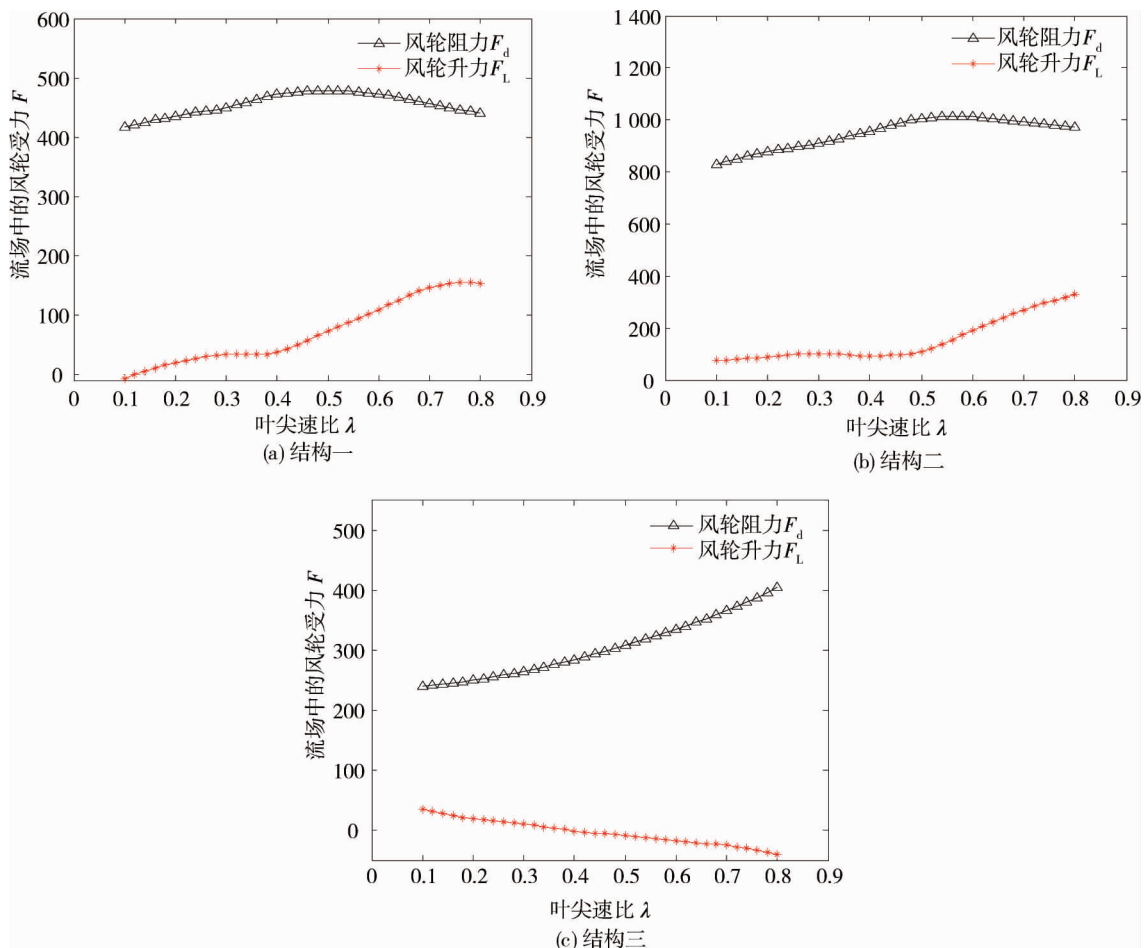


图3 各机型升力和阻力对比结果

3种结构受力对比图如图4所示,纵向对比了3种机型的受力情况。图4a为3种机型的阻力对比,从图中可以看出:结构二的阻力最大,结构三的最小。图4b为3种机型的升力对比,可以看出:虽然结构二的升力最大,但相对于阻力来说,变化范围很小,且在叶尖速比 $\lambda < 0.2$ 时,结构一的升力最小,但 $\lambda > 0.2$ 后,结构二的升力超过结构三且差距不断拉大,而结构三的升力不断减小,最终变为负值,即随速度增大,升力会逐渐达到反向最大值。产生该结果的原因也是阻力型风力机转速低的先天不足而导致的升力小、阻力大。

在低转速时,无论是升力型还是阻力型风力机的升力都较小.此外,3种结构的流场受力仿真数据见表1~表3所示.

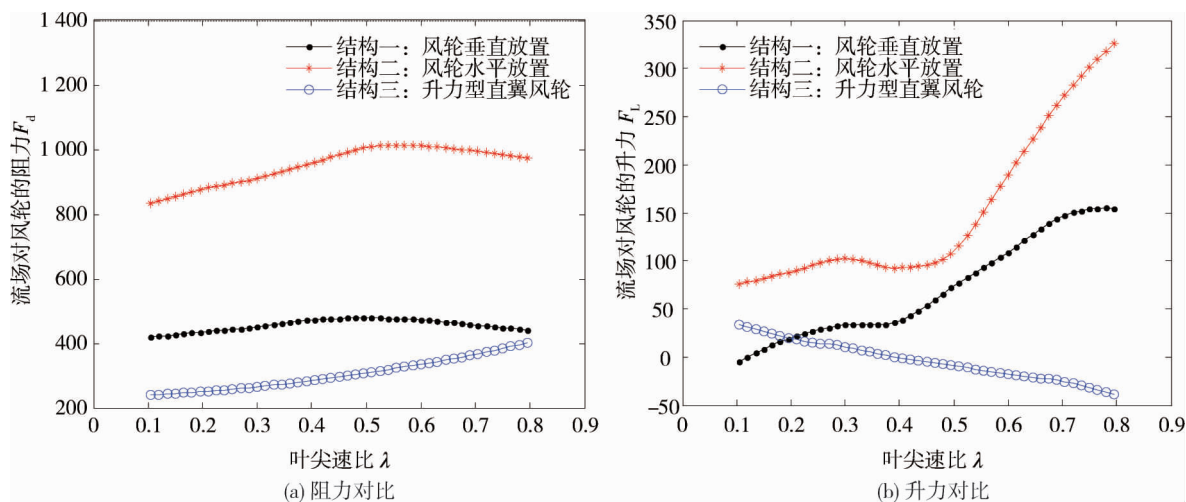


图4 受力对比

表1 结构一型风力机受力对照

N

$\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.9	1.8	2.7	3.6	4.5	5.4	6.3	7.2
F_d	417.07	435.69	449.77	472.04	477.97	472.58	456.16	440.08
F_L	-6.68	19.99	33.37	37.22	73.48	108.90	146.26	154.10
F	417.12	436.15	562.02	473.51	483.59	484.97	479.03	466.28

表2 结构二型风力机受力对照

N

$\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.9	1.8	2.7	3.6	4.5	5.4	6.3	7.2
F_d	830.02	877.48	909.91	957.72	1 006.09	1 011.26	994.64	972.14
F_L	75.55	88.51	102.27	92.52	109.90	189.68	269.03	328.27
F	833.45	881.93	915.64	962.18	1 012.07	1 028.89	1 030.38	1 026.07

表3 结构三型风力机受力对照

N

$\omega/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	0.9	1.8	2.7	3.6	4.5	5.4	6.3	7.2
F_d	239.61	250.22	265.53	284.60	309.10	335.15	366.08	404.47
F_L	34.70	19.14	10.66	-1.29	-9.12	-18.16	-25.27	-40.16
F	242.11	250.95	265.74	284.60	309.23	335.64	366.95	406.46

3.2 风力机参数对比

风力机的风能利用系数与转矩系数是表征其性能的重要参数,经仿真计算得到风力机的风能利用系数和转矩系数随叶尖速比变化的关系对比图,如图5所示,设定风流速度 $v=9 \text{ m/s}$.

从图5a中可以看出:风轮水平放置结构风力机的风能利用系数最大,风轮垂直放置结构次之,升力直翼型风轮结构最小.前两者的风能利用系数随叶尖速比的变化趋势一致,都随叶尖速比的增加先增加后减小,且达到最大风能利用时的最佳叶尖速比分别为0.4和0.5,而结构三的风能利用系数随叶尖速比的增加而减小.前两者风能利用系数的最大值点,即在该风速下发电功率最大点,风力机应长期在该点运行,结构三在叶尖速比很大($\lambda>1$)时也有其最大值点,升力型风力机适用于高风速场合.

从图5b中可以看出:3种机型的转矩系数随叶尖速比的变化趋势一致,都随叶尖速比的增大而减小.之所以产生这种趋势,主要是因为转矩和转速共同决定着功率,当转速增加时,转矩必然减小,转矩系数随之下降.风轮水平放置机型转矩系数最大,风轮垂直放置机型稍小,不过两者相差不大,而升力直翼型风轮结构的转矩系数最小,最大也仅有5%左右,因此,这种机型结构相较于前2种结构的风力机型在相同的流

场条件下不易起动.

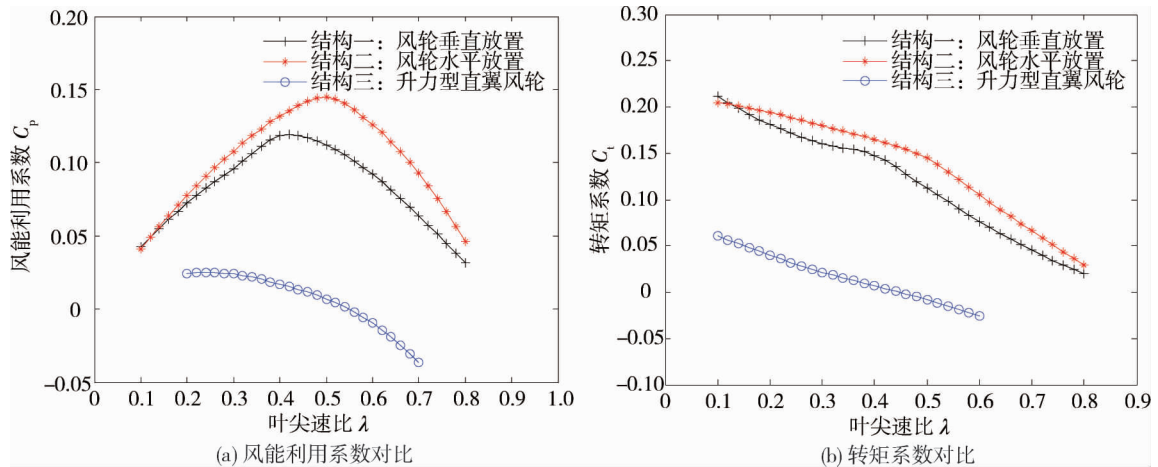


图 5 3 种结构的风能利用系数和转矩系数对比

此外,由流场分析计算得到 3 种结构风力机的转矩 T_1, T_2, T_3 和功率 P_1, P_2, P_3 如表 4 所示.

表 4 3 种机型转矩和功率对照

$\omega / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	结构一		结构二		结构三	
	T_1 / Nm	P_1 / W	T_2 / Nm	P_2 / W	T_3 / Nm	P_3 / W
0.9	178.23	160.41	295.01	265.51	20.39	18.35
1.8	152.21	273.98	290.39	522.70	13.40	24.12
2.7	134.50	363.15	258.56	698.11	7.15	19.31
3.6	124.27	447.37	237.04	853.34	2.35	8.46
4.5	94.29	424.31	208.05	936.23	-2.72	-12.24
5.4	64.39	347.71	151.32	817.13	-8.81	-47.57
6.3	38.12	240.16	95.29	600.33	-15.41	-97.08
7.2	16.72	120.38	41.66	299.95	-16.08	-115.78

4 3 种机型不同位置的尾迹参数对比

风流过旋转的风轮之后,因为有能量转移,尾迹处会发生很大的变化,包括风速减小、湍流强度增加和出现明显的风剪切层.由于整个风电场中不是单单只有 1 台风力机,这样由于上游风力机的影响导致风速的减小,还会使下游风力机的输出功率降低,并且尾迹附加的风剪切和强湍流会影响下游风力机的疲劳载荷、使用寿命和结构性能.而这种变化经过一定距离后,在周围气流的作用下,便逐渐得到恢复.因此,为提高风电场的发电效率 and 经济效益,对风力机附近的尾迹研究是很有必要的.

为便于论述,将 3 种机型分别建立在三维笛卡尔坐标系中, x 轴, y 轴, z 轴的正方向如图 6 所示.从中可以看出: x 轴负方向为风流方向, y 轴为风轮径向, z 轴为风轮轴向.空间中长方体为设定的流场域,本文假定风向为自左至右的单向来流(如箭头所示).

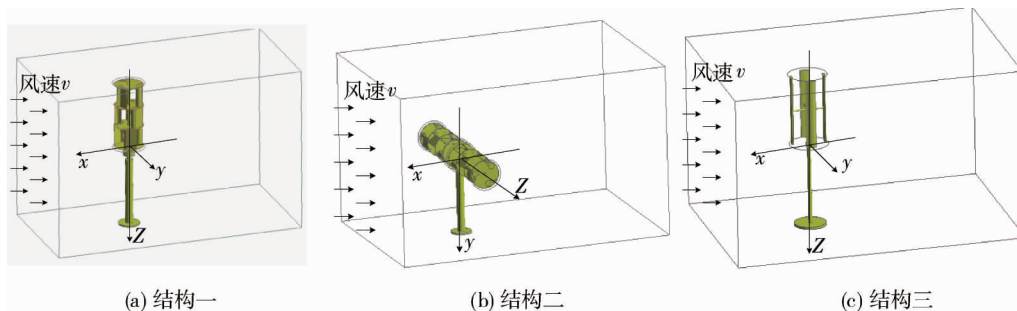


图 6 置于坐标系中的风力机

4.1 风轮下游 2D 处径向近尾迹分布对比

当风流经风轮后,风力机下游尾迹变得十分复杂,这里研究 3 种机型下游 2D 处径向近尾迹分布情况 (D 为风轮直径).设置给定风速 $v=9\text{ m/s}$,最佳叶尖速比 $\lambda=0.4$ 时计算结果如图 7 所示.

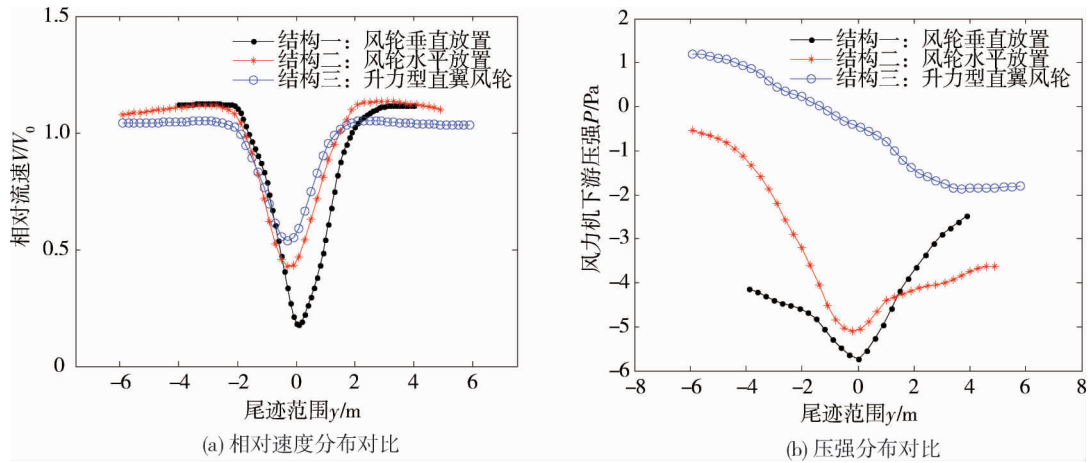


图 7 下游 2D 处径向近尾迹对比

从图 7a 中可以看出:流过 3 种机型的相对风速速度随径向近尾迹 y 的变化趋势相一致,呈“V”型.风流经结构一风轮时的风流速度下降最大,结构二次之,结构三下降最少,整体上具有较好的对称性.而当在风轮两侧时,流速却稍高于给定风流速度,这是由于旋转的风轮在近尾迹区风剪切和强湍流造成的.在远离风力机处,相对流速稳定在 1 附近.该图表明风轮对来流具有强的阻挡作用,使得尾流速度降得很低,这与经典的 Jensen 尾流模型相一致.此外,当风流经风轮时不仅对风轮产生压强,而且该压强还会随尾迹的后移而变化.

图 7b 给出了 3 种机型在风轮下游近尾迹区的压强分布,不再具有对称性,其原因为风轮在风流的作用下必然产生一个压差,推动风轮转动.从图中可以看出:结构一与结构二的压强为负值,且越接近风轮压强越小,结构一在风轮中心处的压强最小;结构三中,随着与风轮的接近,压强值逐渐趋向于 0;在两个方向逐渐远离风轮的过程中,压强的变化趋势不一致,一方为正值,一方为负值.从整体上看,在相同的流场条件下,结构三的风轮后 2D 处压强模值最小,原因是这种直翼型叶片结构的实度较小.

4.2 沿风流方向的流场分布对比

风流经风力机时,风力机对周围的流场具有阻碍作用,产生复杂的变化,当风流自上游穿越风力机到下游的过程中,对它的相对风速和压强分布进行计算.设定风流速度 $v=9\text{ m/s}$,最佳叶尖速比 $\lambda=0.4$ 时进行流场计算,其结果如图 8 所示.

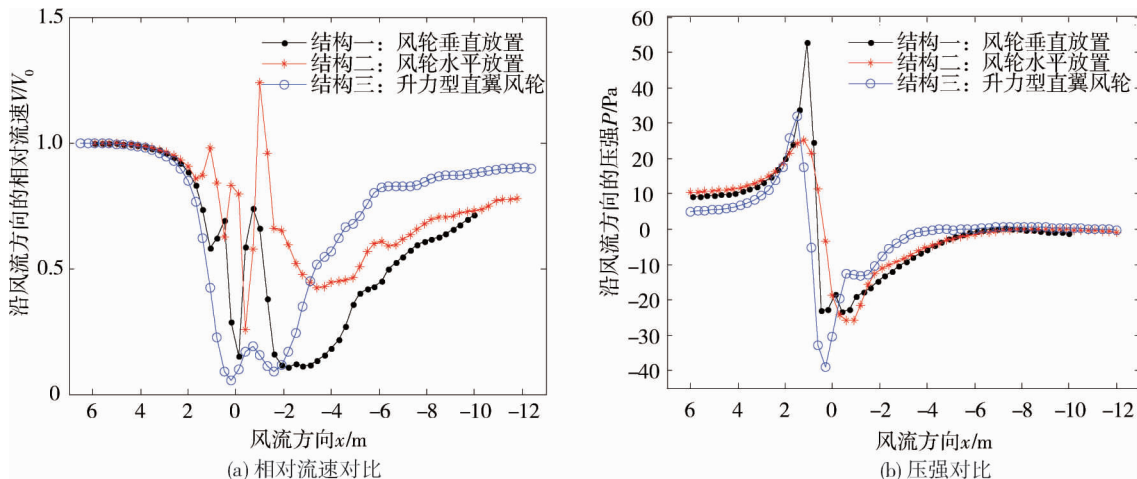


图 8 沿风流方向的流场分布对比

图 8a 给出了沿风流方向 x 轴方向的相对速度流场分布情况,可以看出:在 3 种风力机机型上游,流场的相对速度一致,均为 1.随着与风轮的靠近,风流相对速度减小,高低震荡,变得复杂,且风轮水平放置机型震荡最大,相对速度下降最少;垂直放置机型震荡稍大,相对速度下降稍小;升力直翼风轮震荡最小,下降最多.随着风流到风力机下游,风流速度开始恢复,相对流速随距离的增大而不断上升,且升力直翼型风轮的相对流速上升最快最高,在风轮后 $3D$ 左右基本达到给定流速.同时风轮垂直放置结构的相对流速虽下降较多但上升较快,它与结构二都是在 $5D$ 左右时,相对流速才基本恒定,即使距离比结构三增大了,但相对转速仍较小.在图中, x 为 $-2 \sim 2$ m 时表示在风轮的内部,可见风轮内部的湍流相当复杂,目前还没有比较完善的理论模型对湍流进行表述,因此本文对这些复杂的湍流不予考虑,而是将研究重点放在风轮之后的尾流中.从图中可见这些尾流与叶片结构、扫掠面积和风轮实度有很大的关系.

图 8b 给出了 3 种风力机分别沿风流方向的压强对比结果,可以看出:3 种结构的压强走势相同.在临近风流入口处,压强为恒值,随着与风轮的靠近,压强逐渐增大,当风流穿越风轮时压强迅速较小到负值,随着风流穿过风轮后距离的增大,压强开始恢复到 0 Pa.当风流接近风轮时,结构一的压强增加的最多;当风流穿过风轮后,结构三压强下降的最多;在风流穿过风轮前后时,结构二的压强提升和恢复的较均匀.在风轮后 $3D$ 处,3 种结构的压强都稳定在了恒值 0 Pa 处.从总体上看,该图为 Jensen 尾流模型的又一表述法即 Jensen 尾流模型的压强表述法.

4.3 风轮下游 $2D$ 处轴向近尾迹分布对比

风流经风力机的风轮后,必然导致下游轴向尾迹分布的复杂变化,且影响的范围与风轮的轴向长度有关,轴向长度越大,影响范围越大.由于尾流具有三维性,单个的二维分析图不具代表性,为此从另一角度引入又一种维度方向的尾流变化情况,在此研究了风轮下游 $2D$ 处轴向尾迹分布情况,其计算结果如图 9 所示.

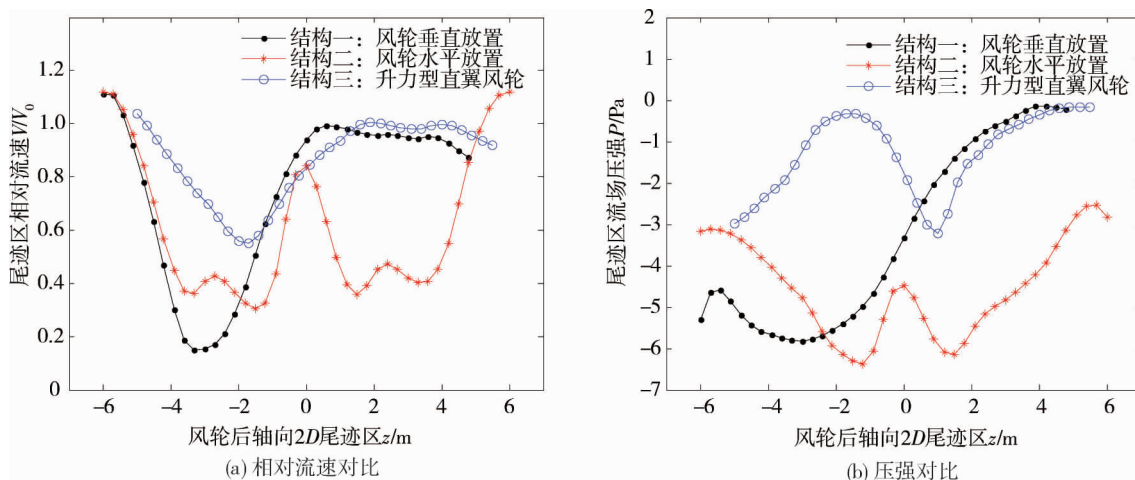


图 9 下游 $2D$ 处轴向近尾迹对比

从图 9a 中可以看出:结构一与结构三的相对流速变化趋势相同,它随着轴向距离的增加先减小后增加之后达到一恒定值不再变化;而结构二随轴向距离的增加,重复 2 次结构一或结构三的规律,并且 2 次具有很好的对称性.之所以有以上变化规律,完全是由风轮的结构所决定的.结构一与结构三由单风轮组成,所以只波动一次,而结构二由双风轮组成,所以相对风速波动了 2 次.风流穿过结构一风轮时,相对流速下降最多,结构二风轮次之,结构三风轮下降最少,说明结构三风轮结构对来流阻碍最小.

图 9b 为下游 $2D$ 处轴向位置处的压强对比,从图中可见,每种结构风力机的压强变化各不相同.结构一与结构三压强变化刚好相反,这同样与风轮实度有关.结构一风轮处随轴向距离的增加有最小值,结构三有最大值,但随着轴向距离的再次增加,这两种结构的压强值逐渐趋近于同一值.结构三的压强变化与相对流速变化趋势一致,这也是由于双风轮结构造成的.

5 结论

1) 随叶尖速比的变化,3种机型升力都小于阻力,分别对比3种机型的升力和阻力,都是风轮水平放置的机型最大,但从几何结构看,风轮垂直放置机型更简单,实际上,任何一种机型都应综合全面考虑其性能,根据各自的特点应用于不同的场合.总之,阻力型风力机适用于低风速场合,而升力型风力机适用于高风速场合.

2) 风轮水平放置的结构二机型的风能利用系数与转矩系数最高,虽然它的风能利用系数与转矩系数等都优于其他2种结构,但是该风力机受风向变化影响大,需安装对风系统.

参考文献:

- [1] 冯放,李岩,陈立新,等.组合型垂直轴风力机气动特性的模拟计算与实验研究[J].太阳能学报,2014,35(5):855-860.
- [2] 王绍龙,李岩,和庆斌,等.直径比对组合型垂直轴风力机气动特性影响仿真计算[J].可再生能源,2014,32(1):63-67.
- [3] Dabiri J O. Potential order-of-magnitude enhancement of wind farm power density via counter rotating vertical-axis wind turbine arrays[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2010,3(4):73.
- [4] Li C J, Bhalla R, Ling H. Investigation of the dynamic radar signatures of a vertical-axis wind turbine[J]. IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, 2015,14:763-766.
- [5] 王莹,张海杰,曹阳,等.螺旋型垂直轴风力机的气动与启动性能研究[J].工程热物理学报,2014,35(8):1530-1533.
- [6] Albuquerque I M, Matos F F S. A characterization of vertical axis wind turbines [J]. IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS, 2016,14(10):4255-4260.
- [7] Parker M A, Soraghan C, Giles A. Comparison of power electronics lifetime between vertical and horizontal axis wind turbines [J]. The Institution of Engineering and Technology,2016,10(5):679-686.
- [8] Ramadan A, Yousef K, Said M, et al. Shape optimization and experimental validation of a drag vertical axis wind turbine[J]. Energy, 2018, 151: 839-853.
- [9] Pagnini L, Piccardo G, Repetto M P. Full scale behavior of a small size vertical axis wind turbine[J]. Renewable Energy, 2018, 127: 41-55.
- [10] Govind B. Increasing the operational capability of a horizontal axis wind turbine by its integration with a vertical axis wind turbine[J]. Applied Energy, 2017, 199: 479-494.
- [11] Kumar R, Raahemifar K, Fung A S. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018,89: 281-291.
- [12] Muneer A, Khan M B, Sarwar U B, et al. CFD analysis of a Savonius Vertical Axis Wind Turbine[C]//National University of Sciences and Technology (NUST), Center for Advanced Studies in Energy (CASEN). Islamabad, Pakistan,IEEE,2015.
- [13] Rolin F C, Fernando Porté-Agel. Experimental investigation of vertical-axis wind-turbine wakes in boundary layer flow[J]. Renewable Energy, 2018, 118:1-13.
- [14] Lei S, Liu H Z, Yang Z X. Performance comparison for savonius type wind turbines by numerical analysis approaches[C]//Proceedings of the 2015 International Conference on Advanced Mechatronic Systems. Beijing, China, IEEE, 2015:402-406.
- [15] 徐夏,周正贵,邱名.垂直轴风力机叶轮气动性能计算[J].太阳能学报,2012,33(2):197-203.
- [16] Richard R J, Bull L. Toward the coevolution of novel vertical-axis wind turbines[J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2015, 19(2): 284-292.