

李争, 张文达, 韩瑞华, 等. 分布式等角螺旋型垂直轴风力机的设计及性能分析[J]. 湖南科技大学学报(自然科学版), 2021, 36(3):65-74. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.010

LI Z, ZHANG W D, HAN R H, et al. Design and Performance Analysis of Distributed Equal Angle Spiral Vertical Axis Wind Turbine [J]. Journal of Hunan University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2021, 36(3):65-74. doi:10.13582/j.cnki.1672-9102.2021.03.010

# 分布式等角螺旋型垂直轴风力机的 设计及性能分析

李争<sup>1\*</sup>, 张文达<sup>1</sup>, 韩瑞华<sup>1</sup>, 田永胜<sup>2</sup>

(1. 河北科技大学 电气工程学院, 河北 石家庄 050018; 2. 阿左旗吉兰泰镇精盐分厂, 内蒙古 阿拉善盟 750333)

**摘要:**提出一种新型鹦鹉螺等角螺旋垂直轴阻力型风力机,基于流体动力学分析软件,通过建立三维模型,对其气动特性进行研究;依据空气动力学的知识,模拟风力机与空气之间的流-固耦合,分析风力机的风速分布以及风轮受力等.建立了风轮的数学模型,并根据仿真中得到的转矩、风力机转速等参数作为发电机的输入,使用矢量控制的方法,建立永磁发电机的数学控制模型,得到发电机的电流、电压、功率等输出特性曲线.与实测得到的实验数据进行验证对比,验证了仿真数据的准确性,证实了新型风力机的可行性,为风力机结构优化设计及其发展提供了借鉴和参考.

**关键词:**鹦鹉螺等角螺旋风力发电机;流体力学;起动性能;风力发电;矢量控制

**中图分类号:** TH122      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-9102(2021)03-0065-10

## Design and Performance Analysis of Distributed Equal Angle Spiral Vertical Axis Wind Turbine

LI Zheng<sup>1</sup>, ZHANG Wenda<sup>1</sup>, HAN Ruihua<sup>1</sup>, TIAN Yongsheng<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018, China;

2. Azuo Banner Jilantai Town Precision Salt Branch Factory, Alxa league 750333, China)

**Abstract:** A new type of Nautilus isometric spiral vertical axis resistance wind turbine was proposed, based on the fluid dynamics analysis software, study on its aerodynamic characteristics by establishing a three-dimensional model. Based on the knowledge of aerodynamics, the wind turbine and air were simulated. The fluid-solid coupling between the wind turbine and the wind turbine were analyzed. The mathematical model of the wind wheel was established, and the parameters such as torque and wind turbine's speed obtained in the simulation were used as the input of the generator. The mathematical control model of the permanent magnet motor was established by using the method of Vector control, the output characteristic curve of the generator's current, voltage and power. And compared with the experimental data obtained in practice, the accuracy of the simulation data was verified, and the feasibility of the new wind turbine was confirmed. The new wind turbine provided reference for the optimization design and development of the wind turbine structure.

收稿日期:2019-03-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877070; 51577048);河北省自然科学基金资助项目(E2021208008; E2018208155);河北省高层次人才资助项目(A201905008);高节能电机及控制技术国家地方联合工程实验室开放项目资助(KFKT201901)

\*通信作者, E-mail: Lzhfgd@163.com

**Keywords:** nautilus isometric spiral wind turbine; fluid mechanics; starting performance; wind power; vector control

随着世界环境的不断恶化,各国都在大力发展新能源产业,风力作为一种重要的可再生资源,是世界可再生能源发展的重要风向.目前风力发电是利用风能的主要形式之一,发展迅速.风力发电机按其转轴的方向分为垂直轴风力机和水平轴风力机.垂直轴风力机不受风向约束,依靠风的阻力进行旋转,且不需要水平轴风力机必需的变速箱,具有结构简单、启动转速低、噪声小、造价低等优势,但是由于其风能利用率较低,也成为制约其大力发展的主要因素之一,因此,提高风能利用率是研究垂直轴风力机的最主要方向<sup>[1]</sup>.

目前,垂直轴风力机中被普遍接受的主要有萨渥纽斯、达里厄、塞内加尔3种,各国的研究工作者在这3种风力机的基础上做出了巨大改进.文献[2]用2种湍流模型分析了萨渥纽斯风力机的风动性能;文献[3-4]均提出叶片重叠率和雷诺数不同的风轮模型,萨渥纽斯式风力机可以获得不同的风能利用率,二者通过不同的方法证实了这一点;文献[5-6]提出相位角的变化对提高萨渥纽斯风力机的气动性能有十分重要的影响;文献[7]基于游泳鱼的仿生模拟,提出了一种新型鱼鳍转子,并验证了其性能良好;文献[8]结合传统的萨沃纽斯风力转子结构和鱼脊结构设计了一种新型摇曳式风力转子,新型风力机在较低的叶尖速比条件下具有更好的扭矩和功率系数性能;文献[9-10]将达里厄型风力机和萨渥纽斯型风力机相结合,获得了一种低启动速度和高效率的新型风力机.

基于上述研究,提出一种新型阻力型垂直轴风力机,以提高风能利用率.基于鹦鹉螺的仿生模拟,提出并讨论了鹦鹉螺等角螺旋线型风轮,并通过流体动力学(CFD)方法优化结构参数,由于其风轮形状看起来像鹦鹉螺的角,因此称为鹦鹉螺等角螺旋线型风力发电机.

## 1 垂直轴风力机基本参数分析

### 1.1 基本特性

1) 尖速比 TSR 指风轮叶轮最外端的线速度与外界来流风速之比,是风力机设计中最为重要的参数之一<sup>[11]</sup>.在来流风速恒定时,增加风叶半径或风叶旋转加速度,其值增大.其计算式为

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

式中:  $R$  为风叶半径;  $\omega$  为风叶旋转角速度;  $v$  为来流风速.

2) 风能利用系数  $C_p$  指风力机对风能的转换效率<sup>[12]</sup>,即风能一定时,吸收风能的多少.其计算式为

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

式中:  $T$  为风轮转矩;  $\rho$  为空气密度;  $A$  为扫掠面积.

3) 转矩系数  $C_m$  用于衡量风力机产生转矩的大小<sup>[12]</sup>.其计算式为

$$C_m = \frac{2T}{\rho D A v^3}. \quad (3)$$

式中:  $D$  为风轮半径.

4) 风轮实度  $\delta$  指风叶的实际面积与风轮扫掠面积的比值<sup>[1]</sup>.其计算式为

$$\delta = \frac{S}{2\pi R}. \quad (4)$$

式中:  $S$  为风轮实际面积.

由式(1)~式(4)可知,本文中应用的是一种高实度比、低风速、低转速、大力矩的阻力型风力机.

### 1.2 层流与紊流

层流与紊流是气流因存在黏滞性,具有的2种状态,其状态通过雷诺数进行衡量<sup>[3-4]</sup>,其计算式为

$$\text{Re} = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (5)$$

式中:  $\mu$  为动力黏度系数.

雷诺数小于下临界雷诺数时,流动为层流;雷诺数大于上临界时,流动为紊流.上下临界值之间,被称为过渡状态.一般条件下,雷诺数为 2 300.

## 2 风轮的分析计算

### 2.1 结构建模

新型垂直轴阻力型风力机主要由以下部分构成:鸚鵡螺等角螺线风轮、垂直轴、底座、增速箱、发电机、控制器、蓄电池等.风轮由等角螺线叶片和轮毂组成,图 1 为风力机整体及局部示意图,叶片呈椭圆形或对称等角螺线型.其中风轮共有 3 个叶片,每个叶片的螺线角度为  $180^\circ$ .风轮高 0.3 m,半径 0.65 m,风力机总高度为 5 m.

本文所研究的风力机以达里厄风力机为原型,设计了一种鸚鵡螺等角螺线结构,如图 1 所示,将风轮与地面与水平放置,绕垂直轴旋转,既能增大迎风面积,又能减小背风面和风轮的阻力,同时背风叶片伸到迎风叶片内部,实现加速导向作用,以较小的风力推动风轮旋转,提高风能转化效率,提升发电效率.本文所研究的风力机为小功率风力发电装置,其额定功率为 300 W,启动风速在 1.5~2.0 m/s,风力机正常运行的风速范围在 9~12 m/s.

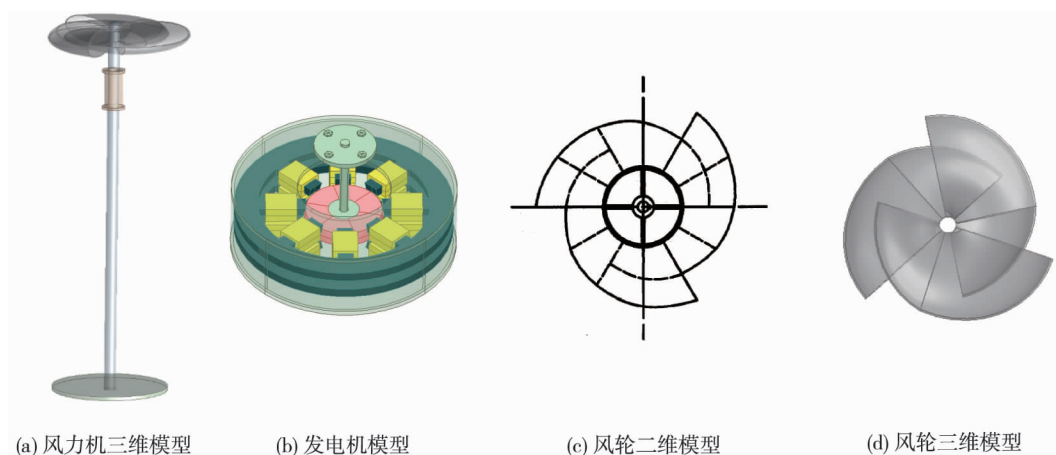


图 1 风力发电机整体及风叶

### 2.2 网格无关性验证

在有限元软件中进行仿真计算时,进行网格无关性的验证是必不可少的.在进行本文研究的风力机仿真时自动剖分、四面体及六面体剖分均可以实现,但考虑到四面体及六面体剖分方法存在精度低、耗时长、求解复杂等缺点,因此本文采用的是自动剖分网格.这种剖分方法具有较高的智能性、速度快等优点.自动网格剖分及四面体网格剖分图如图 2 所示.

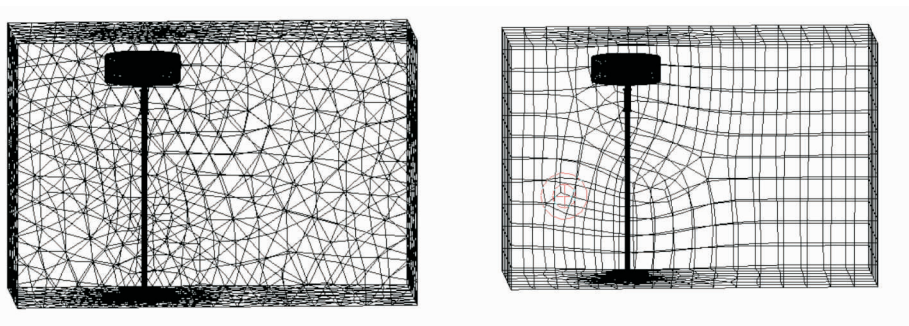


图 2 自动网格剖分及四面体网格剖分

在自动剖分的网格下进行网格无关性验证,改变网格的数量,观察风力机转矩的变化情况,其变化曲线如图3所示,由图3可知,随着网格数目的增加,转矩呈上升趋势,在网格达到50万时,其转矩达到最大值,为2.2 N·m;在网格数达到70万时,其转矩基本趋于稳定,为2.175 N·m.因此,本文后续的仿真是在网格数为70万的设定下完成.

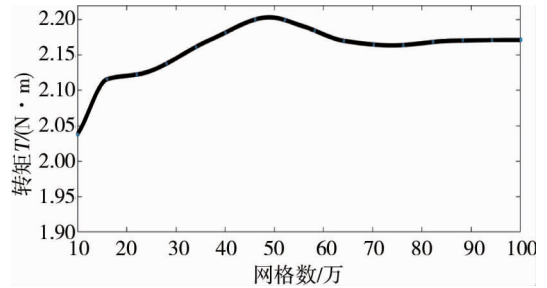


图3 网格数目-风力机转矩关系

### 2.3 仿真结果分析

由第二部分对风力机基本特性的分析可知,尖速比、风能利用系数、转矩系数是验证风力机性能好坏的最重要的3个参数,也是衡量风力机功率的重要指标.因此研究这三者之间存在的关联及相关变化规律是必要的.在计算过程中,设定来流风速5 m/s,通过改变相应的参数,使得尖速比在0~1之间变化,得到风能利用系数随着尖速比的变化曲线如图4所示.尖速比的范围是0.1~0.7,风能利用系数随着尖速比的变化,先升高后下降,在尖速比TSR=0.4时,风能利用系数 $C_p$ 达到最大值.将风力机转速稳定在一定转速内,可实现风能的最大利用效率.

图5是风速在5 m/s时,TSR取不同值时得到的尖速比-转矩系数曲线图.由图5可知:随着TSR的增大,转矩系数的值逐渐增大,在TSR为0.40时,转矩系数达到最大,TSR为0.10时,转矩系数不超过0.30.各个曲线波动均较小.风轮无论旋转到什么角度,其转矩值都是正值.风轮由3个风叶构成,因此其转矩在120°内周期变化,由此说明,风力机所受合力对风力机做正功.

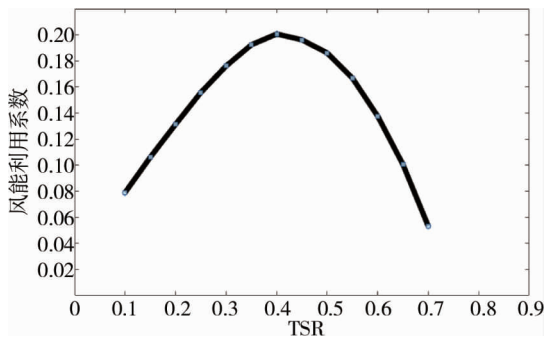


图4 风能利用系数

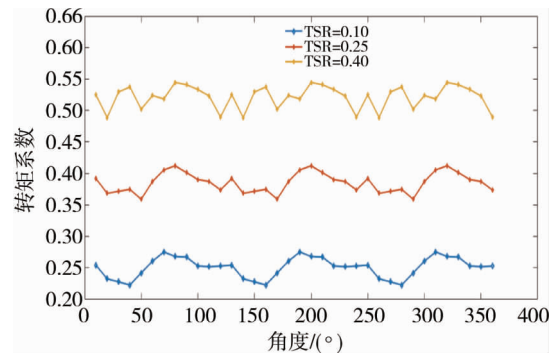


图5 不同TSR时转矩系数

图6为风力机风叶整体压力分布图,可以看出,在风轮上下部,尤其是3号风轮,即风力机进风口的上下部,所受压力较大.图7为风力机风轮的速度矢量流线图,图8为风轮所在平面速度云图,图9及图10为风轮在 $u, v$ 这2个方向的分量,在 $w$ 方向的速度分量极小,可忽略.由图8可知,风力机周围及内部的速度分布较为复杂,在来风穿过风力机后,形成尾流扩散区,以及正常流速区.在来流穿过风力机后,大量风能聚集在3号风轮,1号风轮次之,2号风轮背对来流风速,没有风速,并负责提供动力,这也是3号风轮所受压力较大的原因.在风轮的影响下,穿过风轮的风速均迅速变小,减小的风能大部分转化为风力机的动能,再由风力机转化为发电机的电能,小部分消耗在平板及齿轮损耗上.

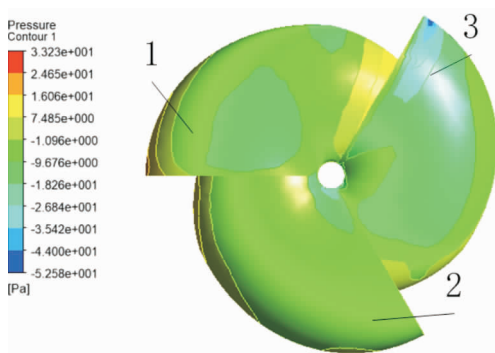


图6 风轮压力分布

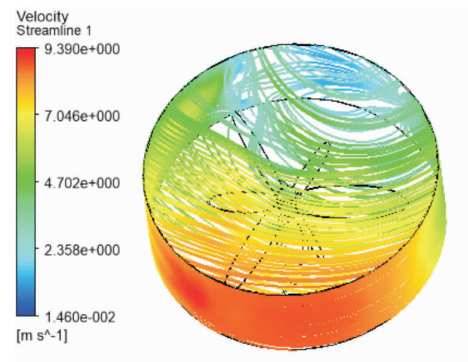


图7 风轮速度矢量

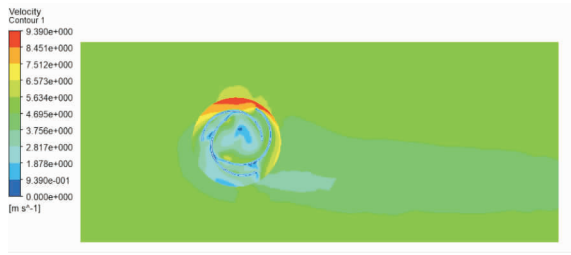


图 8 风轮速度云图

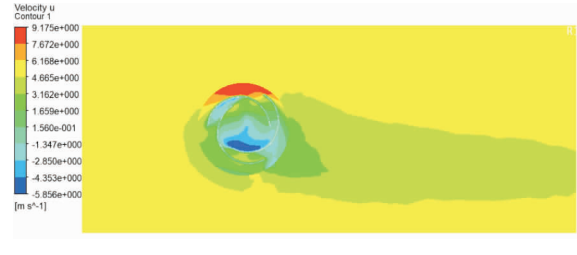


图 9 风轮 u 方向速度云图

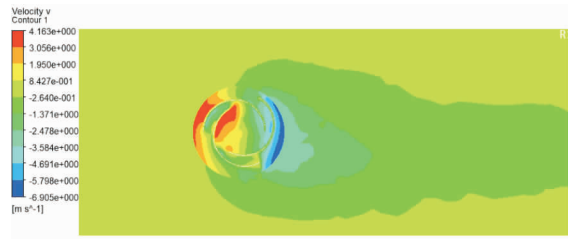


图 10 风轮 v 方向速度矢量

### 3 发电特性研究

根据上节对新型垂直轴风力机的特性研究,将其与永磁同步发电机通过传动机构进行连接.以仿真软件为工具,结合各自特点,计算风轮转矩以及发电机内电能转换.将通过仿真得到的风轮转矩、风轮转速等数据加到发电机控制模块,获得发电效率、电流、电压等参数.二者进行连接的具体步骤如图 11 所示.

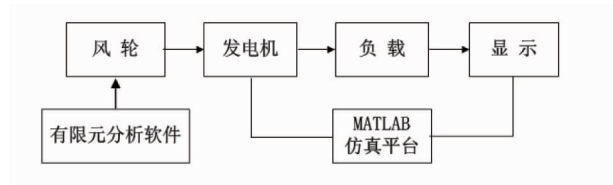


图 11 仿真步骤

根据图 11 可知,风力机转轴的运动带动发电机旋转,其驱动电机旋转的动态方程为

$$T - T_f = J \frac{d\omega}{dt} \tag{6}$$

式中:  $T_f$  为阻力转矩;  $J$  为风力机转动惯量.

#### 3.1 发电机数学模型

本文应用永磁同步电动机,在将二维静止坐标系下的转矩方程转化为旋转坐标系下,忽略定子铁芯的涡流损耗和磁滞损耗,定子电压方程为

$$u_d = R i_d + p\psi_d - \omega\psi_q; \tag{7}$$

$$u_q = R i_q + p\psi_q - \omega\psi_d. \tag{8}$$

式中:  $p$  为微分算子;  $\omega$  为转子旋转电角速度;  $R$  为定子线圈的电阻.

$$\psi_d = \psi_f + L_d i_d; \tag{9}$$

$$\psi_q = L_q i_q. \tag{10}$$

式中:  $\psi_f$  为转子磁链;  $L_d, L_q$  为  $d, q$  轴电感;  $i_d, i_q$  为  $d, q$  轴电流.

电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]. \tag{11}$$

式中:  $n_p$  为电动机的极对数.

#### 3.2 模型搭建

为了对风力机发电特性进行研究,搭建仿真模型,首先建立风力机模块,如图 12 所示,风力机模块以来流风速以及风力机转速作为输入,得到相应的转矩数据,将风力机中得到的转矩数据加到搭建的发电机

模块中,并对发电机进行矢量控制<sup>[13-19]</sup>.控制模型如图13所示,模型大致可以分为风力机转矩拟合模块、电流PI控制模块、转速PI控制模块、SVPWM模块以及PMSG模块.在图13的发电机模块中,已经完成了Park变换和Clark变化,因此输出得到的是定子电枢的交、直流电流.通过控制直轴电流控制磁场大小,控制交轴电流来控制电机转矩.当 $i_d=0$ 时,转矩与交轴电流呈线性关系,此时只需控制直轴电流为0可即控制电机转矩.

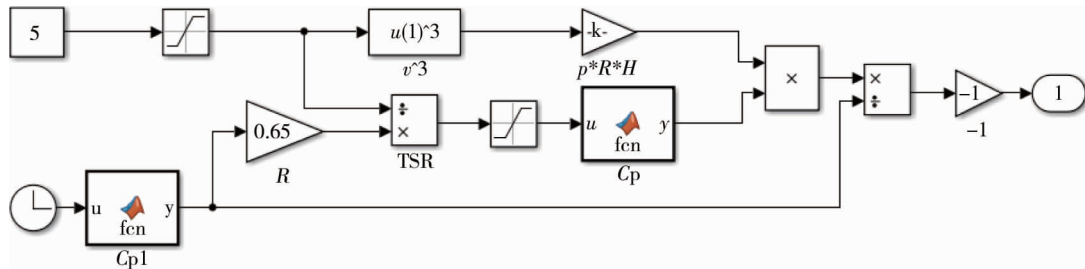


图12 风轮转矩模块

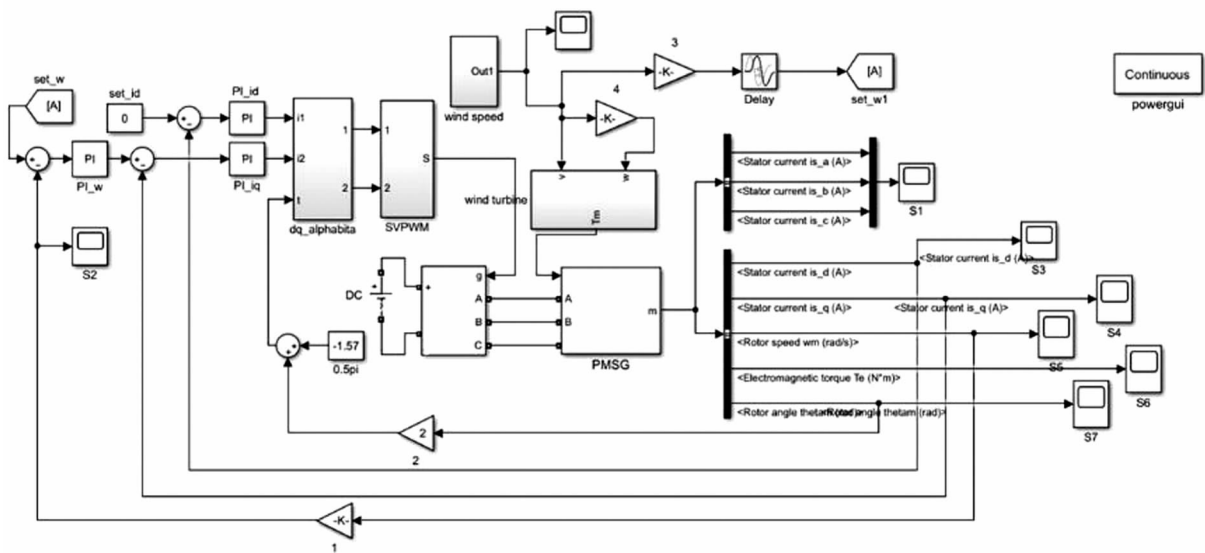


图13 风力发电机矢量控制模块

在风力机模块中,设定来流风速为5 m/s,转速为3.3 rad/s,将得到的转矩数据加到发电机模块,仿真时间为0.3 s,得到如图14所示的发电机定子电流、转子转速、旋转角度、转矩;图15为发电机三相电流,输出电流为平滑的三相电流,风力机发电效果符合预期.

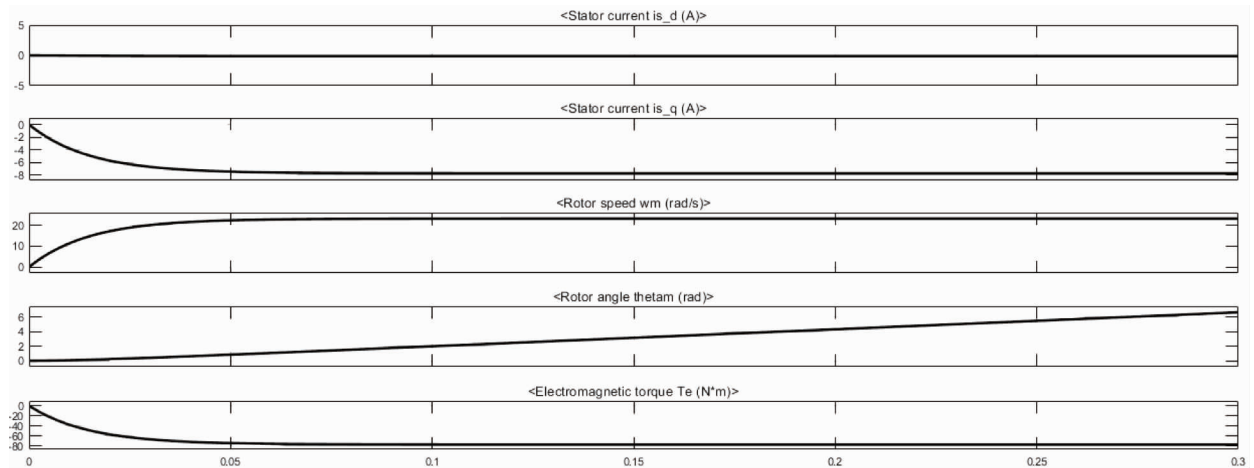


图14 发电机运行参数曲线

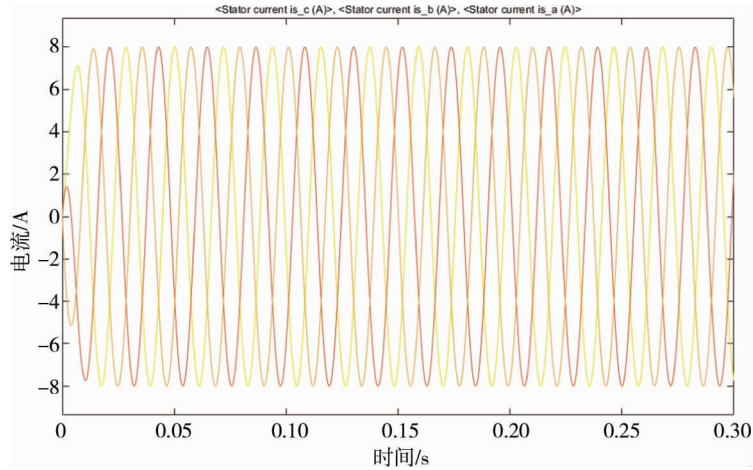


图 15 发电机三相电流

上述结果均是在风速恒定条件下完成,为了更加贴近实际风速下风力发电机的运行情况,对自然状态下的风速进行模拟,计算时间为 5 s,图 16 为风速仿真模型,图 17 为风速变化曲线.

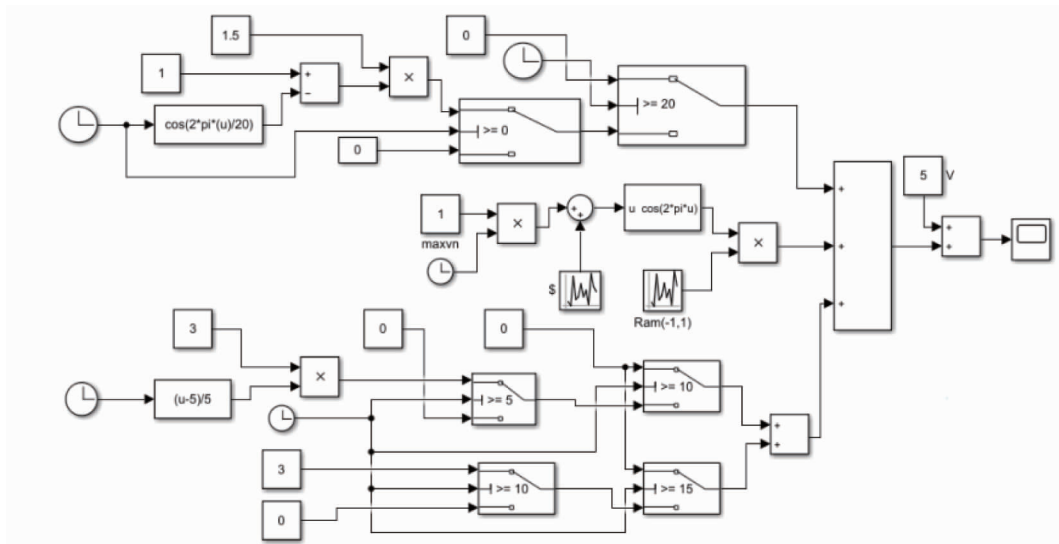


图 16 风速模拟模块

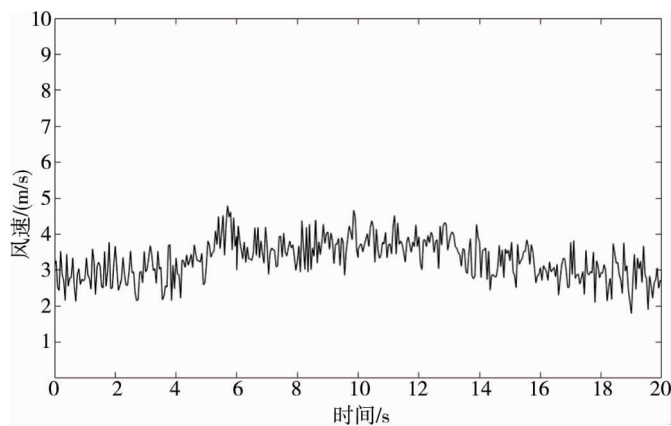


图 17 风速变化曲线

图 18 和图 19 是风力发电机转速曲线和三相电流曲线.从图 18 和图 19 中分别可以看出,由于风速的不稳定,电机转速与三相电流也受到了一定的影响,但其波动不大,在可以接受的范围内,反映了在真实风速下发电机的运行情况.

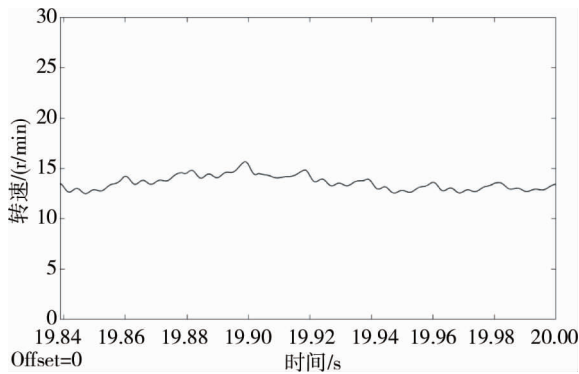


图 18 电机转速曲线

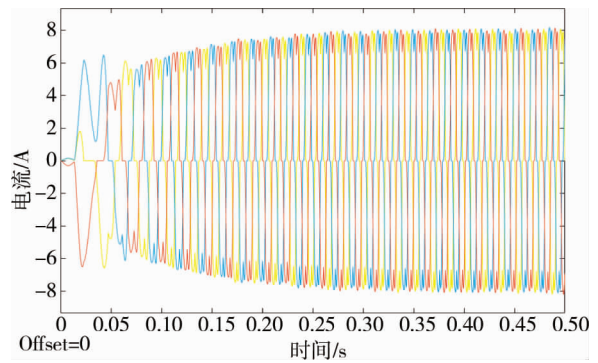


图 19 自然风速下三相电流

## 4 实验验证

为了验证仿真的准确性,进行了实验验证,按照仿真数据,设计了如图 20 所示的风力机,风力机参数见表 1.在此基础上,加入了图 21 所示 sengal 式风力机,以验证新型风力机性能的优越性,对 2 种风力机运行过程中的功率及风能利用率等参数进行了实测.



图 20 实验用风力机



图 21 实验用风力机

表 1 等角螺线型垂直轴风力机参数

风力机参数	参数值
风轮数	3
风轮半径/m	0.65
风轮直径/m	1.3
额定功率/w	300
启动风速/(m/s)	1.6
额定风速/(m/s)	10

图 22 为风速在 1~11 m/s 时等角螺线型垂直轴风力机的仿真计算、实验功率以及 sengal 风力机实际功率对比图,由图 22 中仿真与实验功率可知,风速在 6 m/s 之前,2 条曲线功率相差不大,其原因在于仿真建模与风力机实际尺寸之间存在误差;在风速达到 6 m/s 之后,两者之间的差距逐渐增加,仿真所得功率大于实际测量功率,其原因在于实际测量过程中,尖速比不够大,没有达到最大功率跟踪.由实验功率与 sengal 风力机实际功率可知,在低风速区,新型风力机的功率远大于 sengal 风力机,说明新型风力机具有更低的启动风速,在低风速区的运行性能好于 sengal 风力机,随着风速的增加,sengal 风力机功率获得较大提升,但是其功率还是略小于新型风力机.

图 23 为风速在 1~11 m/s 时的仿真计算所得风能利用系数与实验数据得到的风能利用系数的对比图,由图 23 中仿真与实验风能利用率可知,仿真所得的风能利用系数稍大于实验数据计算所得风能利用



系数,其原因在于风力机在实际运行过程中,转轴、变速箱等传动机构会存在一定的损耗,这些损耗在仿真中是不存在的,再加之自然界中风力的不稳定性,故而存在一定的误差是可以理解的;由实验风能利用率与 sengal 风力机实际风能利用率可知,在新型风力机运行风速范围内,其风能利用率在 9 m/s 之前均大于 sengal 风力机,在 9 m/s 之后,略高于新型风力机,与风速功率对比图相互印证,说明新型风力机在其运行范围内,具有比 sengal 风力机更好的输出功率。

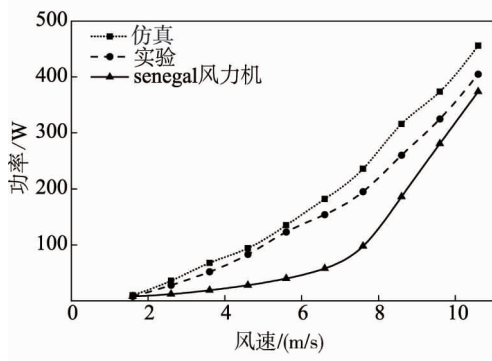


图 22 风速功率特性曲线

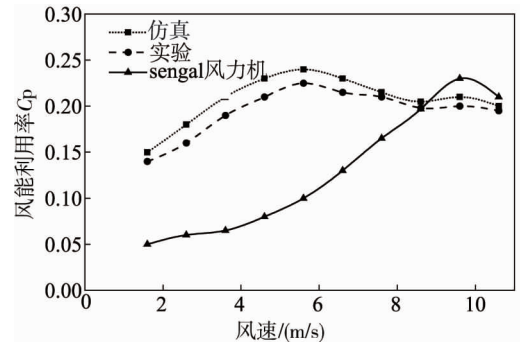


图 23 风速-风能利用率特性曲线

## 5 结论

1) 本文提出一种鸚鵡螺等角螺线垂直轴阻力型风力机,通过有限元软件,得到了风力机基本性能参数,其风能利用率可达到 0.2,且转矩稳定,压力、速度分布符合实际情况;并基于有限元计算数据,搭建了风力发电系统仿真平台,得到了风力机发电特性,发电机输出特性温度,输出电流趋近于正弦波;最后通过建造样机,对比实验与仿真的功率和风能利用率,两者差距不大,验证了仿真计算的准确性、合理性。

2) 对比本文所提风力机与 sengal 风力机,其性能明显优于 sengal 风力机,证明了本文所提风力机的优越性.综合有限元计算、仿真计算及实验验证,证实了所提出风力机的可行性,为垂直轴阻力型风力机的设计及发电特性研究提供了借鉴和参考。

## 参考文献:

- [1] 李争,高培峰,孙甜甜,等. 分布式能源系统垂直轴风力机特性的数值模拟与分析[J]. 电工技术学报, 2017, 32(11): 155-163.
- [2] Jaohindy P, Garde F, Bastide A. Aerodynamic and mechanical system modeling of a vertical axis wind turbine (VAWT) [C]//International Conference on Electrical & Control Engineering. IEEE, 2011: 5189-5192.
- [3] Morshed K N, Mosfeqr R, Molina G, et al. Wind tunnel testing and numerical simulation on aerodynamic performance of a three-bladed Savonius wind turbine [J]. International Journal of Energy and Environmental Engineering, 2013, 4(1): 18-26.
- [4] Akwa J V, Junior G, Petry A P. Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a Savonius wind rotor using computational fluid dynamics[J]. Renewable Energy, 2012, 38(1): 141-149.
- [5] Kumbemuss J, Chen J, Yang H X, et al. Investigation into the relationship of the overlap ratio and shift angle of double stage three bladed vertical axis wind turbine (VAWT) [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2012(107/108): 57-75.
- [6] Chen J, Kumbemuss J, Zhang L H, et al. Influence of phase-shift and overlap ratio on savonius wind turbine's performance [J]. Journal of Solar Energy Engineering, 2012, 134(1): 011016.
- [7] Sagharichi A, Maghrebi M J, Arabgolarcheh A. Variable pitch blades: An approach for improving performance of Darrieus wind turbine [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2012, 8(5): 053305.
- [8] Song L, Yang Z X, Deng R T, et al. Performance and structure optimization for a new type of vertical axis wind turbine [C]//

- International Conference on Advanced Mechatronic Systems. IEEE, 2013: 687-692.
- [9] Ma C, Song L, Zhang M Z. Performance study for a novel vertical axis wind turbine based on simulation analysis[C]// International Conference on Networking, Sensing and Control. IEEE, 2017: 549-554.
- [10] Kou W, Shi X, Yuan B, et al. Modeling analysis and experimental research on a combined-type vertical axis wind turbine [C]//International Conference on Electronics. IEEE, 2011: 1537-1541.
- [11] Ahmed A, Ran L, Bumby J R. New constant electrical power soft-stalling control for small-scale VAWTs[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 25(4):1152-1161.
- [12] 赵振宙, 王同光, 黄娟, 等. 安装角对立轴风轮气动性能影响分析[J]. 电工技术学报, 2014, 34(8): 1304-1309.
- [13] 田兵, 赵克, 孙东阳, 等. 改进型变步长最大功率跟踪算法在风力发电系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2016, 31(6): 226-233.
- [14] 程明, 韩鹏, 魏新迟. 无刷双风力发电机的设计、分析与控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 37-53.
- [15] Liu D, Guo J B, Huang Y H. An active power control strategy for wind farm based on predictions of wind turbine's maximum generation capacity[J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2013, 5(1):050401-583.
- [16] Choi D W, Byun S I, Cho Y H. A Study on the maximum power control method of switched reluctance generator for wind turbine [J]. Transactions on Magnetics. IEEE, 2014, 50(1):1-4.
- [17] Li S, Haskew T A, Williams K A, et al. Control of DFIG wind turbine with direct-current vector control configuration[J]. Transactions on Sustainable Energy. IEEE, 2012, 3(1):1-11.
- [18] Wen C, Liu X. Vector control strategy for small-scale grid-connected PMSG wind turbine converter[C]// PES International Conference & Exhibition on Innovative Smart Grid Technologies. IEEE, 2012:1-7.
- [19] 陈杰, 陈家伟, 龚春英. 变速风力发电系统统一功率控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 256- 265.