

# 垂直轴风力发电机技术综述及研究进展

杨益飞 潘伟 朱焜秋

江苏大学,镇江,212013

**摘要:**系统阐述了垂直轴风力发电机几种主要类型的结构、原理及应用情况,简要介绍了在提高风能利用率方面所作的性能改进以及垂直轴风力发电机几个关键的组成部分取得的最新研究进展,指出垂直轴风力发电机是今后风力发电发展的主要方向。最后,针对目前垂直轴风力发电机研究现状的不足之处,提出了需要进一步研究的问题。

**关键词:**垂直轴风力发电机;性能;结构;关键技术

**中图分类号:**TH133

**DOI:**10.3969/j.issn.1004-132X.2013.05.028

## An Overview and Recent Research Progresses of Vertical Axis Wind Turbine

Yang Yifei Pan Wei Zhu Huangqiu

Jiangsu University, Zhenjiang, Jiangsu, 212013

**Abstract:** This paper formulated several main types of vertical axis wind turbine and their characteristics, operation principles and applications were discussed. The improvement on performance in improving wind power coefficient and the latest development of the main key part were presented. The viewpoints are that vertical axis wind turbine will be the development tendency of wind power. Finally, the conclusion gives a simple view of problems that need further study on the basis of the shortage of the vertical axis wind turbine.

**Key words:** vertical axis wind turbine; performance; structure; key technology

### 0 引言

风力发电机(以下简称“风力机”)根据旋转轴

的不同,可以分为水平轴风力机和垂直轴风力机。水平轴风力机技术成熟,其启动力矩大,启动风速低,能量转换效率高,但其应用主要限于并网发电中。与水平轴风力机相比,垂直轴风力机的主要优势在于不需要偏航系统,设计得到显著简化,另外垂直轴风力机的叶片是以简支梁或多跨连续梁的力学模型架设在风力机转子上的,这和水平轴

收稿日期:2012-01-04

基金项目:江苏省自然科学基金资助项目(BK2012707);江苏省“六大人才高峰”项目(2011-ZBZZ026);江苏高校优势学科建设工程资助项目(苏政办发[2011]6号);江苏省普通高校研究生科研创新计划资助项目(CXZZ11\_0570)

[34] Lind M. Modeling Goals and Functions of Complex Industrial Plants[J]. Applied Artificial Intelligence, 1994,8(2):259-83.

[35] Poll S, Patterson-Hine A, Camisa J, et al. Evaluation, Selection and Application of Model-based Diagnosis Tools and Approaches[C]//Proc. of the AIAA Infotech at Aerospace Conference and Exhibit, Rohnert Park,2007:1-26.

[36] Hayden S C, Sweet A J, Christa S E. Livingstone Model-based Diagnosis of Earth Observing One [C]//AIAA 1st Intelligent Systems Technical Conference, Chicago,2004:1-11.

[37] Balaban E, Cannon H, Narasimhan S, et al. Model-based Fault Detection and Diagnosis System for NASA Mars Subsurface Drill Prototype[C]//IEEE Aerospace Conference. Big Sky,2007:1-13.

[38] Mengshoel O J, Darwiche A, Cascio K, et al. Diagnosing Faults in Electrical Power Systems of Spacecraft

and Aircraft[C]//Proceedings of the Twentieth IAAI Conference on Artificial Intelligence (IAAI-08), Chicago, 2008:1699-1705.

[39] Bunus P, Lunde K. Supporting Model-based Diagnostics with Equation-based Object Oriented Languages [C]//Proceedings of the 2nd International Workshop on Equation-based Object-oriented Languages and Tools, Paphos, 2008:121-130.

[40] Isaksson O. Model-based Diagnosis of a Satellite Electrical Power System with RODON [D]. Valla: Linkoping University, 2009. (编辑 陈勇)

**作者简介:**刘鹏鹏,男,1987年生。南京航空航天大学民航/飞行学院博士研究生。主要研究方向为复杂系统建模方法与故障诊断、航空发动机状态监测与故障诊断等。发表论文20余篇。左洪福,男,1959年生。南京航空航天大学民航/飞行学院教授、博士研究生导师。苏艳,女,1976年生。南京航空航天大学民航/飞行学院副教授、博士。孙见忠,男,1983年生。南京航空航天大学民航/飞行学院博士研究生。

风力机用碳纤维增强树脂在非常严格的条件下制造出来的叶片材料相比,材质上的要求和制造难度降低了,完全可以实现国产化。此外,垂直轴风力机的发电机和变速箱均安装在地面,便于维护<sup>[1-2]</sup>。垂直轴风力机的这些优点恰好能弥补水平轴风力机的不足。近年来,对于垂直轴风力机的研究得到了国内外学者的广泛关注,有不少新成果发表在国际会议和权威期刊上<sup>[3-8]</sup>。随着垂直轴风力机项目落户北京市,中国国能风力发电公司这一全球唯一掌握兆瓦级垂直轴风力机核心技术的设备制造企业已经开始批量生产垂直轴风力机。

本文首先在介绍垂直轴风力机的类型和特点的基础上,对几种典型的垂直轴风力机及其改进型风力机的结构、原理和性能方面作了比较分析;然后介绍了风能的相关理论,对垂直轴风力机启动性能和风能利用率的研究现状和存在的不足进行了分析,并将磁悬浮技术引入垂直轴风力机中,以此减小启动转矩,实现“轻风启动,微风发电”;最后,通过垂直轴风力机的几个关键组成部分的分析表明,垂直轴风力机可以利用自身的优势,成为未来风力发电发展的方向。

## 1 垂直轴风力机结构

迄今为止,出现过许多种垂直轴类型的风力机,但由于时代的变迁,其中有不少被淘汰了。垂直轴风力机主要分为以下三种类型:萨布纽斯型风力机、达里厄型风力机和涡轮型风力机。其中,达里厄型风力机根据形状的不同可以分为 $\Phi$ 型和H型;根据叶片形状的不同可以分为直叶片型和弯叶片型。按风力机工作原理分,垂直轴风力机可以分为升力型风力机和阻力型风力机。升力型风力机是依靠升力来工作的风力机,达里厄型风力机属于升力型风力机,升力型风力机风能利用率高,启动转矩小;阻力型风力机是依靠阻力来工作的风力机,萨布纽斯型风力机和涡轮型风力机属于阻力型风力机,阻力型风力机风能利用率低,启动转矩大。本文主要介绍在垂直轴风力机中占据主导地位的萨布纽斯型风力机和达里厄型风力机及其改进型风力机的工作原理。

### 1.1 萨布纽斯型风力机

萨布纽斯型风力机是芬兰工程师 Savonius 于 1925 年提出,并以其名字命名的阻力型垂直轴风力机<sup>[9]</sup>。萨布纽斯型风力机的基本结构是由 2 个半圆形叶片开口相对组成 S 形,并在旋转中心处设有一部分重叠区,其结构原理见图 1。人类

最早使用的风力机是阻力型垂直轴风力机,该类风力机转速不高,但输出扭矩很大,所以常被用于提水等,很少被用来进行风力发电<sup>[10]</sup>,但萨布纽斯型风力机具有启动力矩大、叶片设计简单、不受方向限制等优点。

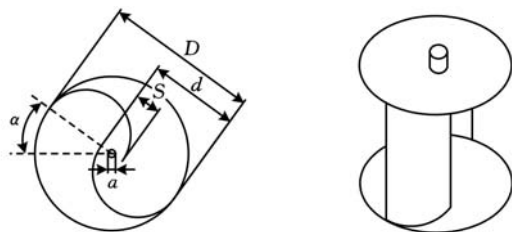


图 1 传统萨布纽斯型风力机结构原理图

Twidwell 等<sup>[11]</sup>和 Eldridge<sup>[12]</sup>证明了萨布纽斯型风力机的风能利用系数( $CP \approx 0.15$ )低于水平轴风力机( $CP \approx 0.45$ )和达里厄型风力机( $CP \approx 0.45$ )的风能利用系数。Kirke<sup>[13]</sup>证明了萨布纽斯型风力机的风能利用系数最大为 0.25。目前国内外学者对于萨布纽斯型风力机的研究多是从叶片个数、叶片重叠比以及偏心系数等方面来提高其风能利用系数,并在萨布纽斯型风力机的基础上提出了改进的结构。

图 2 是 Menet<sup>[14]</sup>设计的改进型萨布纽斯型风力机。他通过在传统的萨布纽斯型风力机上增加一个类似于传统萨布纽斯型风力机的结构来提高转子总的刚度,从而达到提高风能利用系数的目的。另外,设计合理的叶片重叠比 $\beta$ 可以改善动态力矩变化和静态特性。

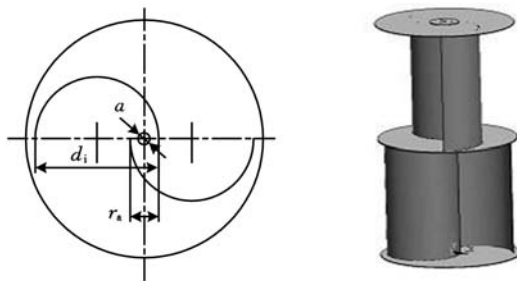


图 2 改进型萨布纽斯型风力机原理图

叶片重叠比公式为

$$\beta = \frac{r_s - a}{d_i} \quad (1)$$

式中, $a$ 为转轴直径; $r_s$ 为重叠部分长度; $d_i$ 为叶片直径。

Menet 同时对设计的样机进行了低速风洞试验以验证风力机性能。这种改进结构的风力机继承了传统萨布纽斯型风力机的优点,但是具有更高的效率,更适合于在居民住宅区进行风力发电,其缺点是增加了系统制作的复杂性。Menet 在设计过程中,对样机的机电系统、材料的选择、发动机、轴承和转轴的选取都有着严格的要求。

Kamoji 等<sup>[15]</sup>和 Saha 等<sup>[16]</sup>在 Menet 设计的改进型萨布纽斯型风力机的基础上,设计出单级布置、两级布置和三级布置结构形式的萨布纽斯型风力机,试验证明这样可以提高传统萨布纽斯型风力机的启动转矩,可以在低风速下自行启动。试验结果表明,在不同的雷诺数下,通过对风力机高度与直径之比以及叠加级数个数效果的比较,图 3 所示三种不同结构风力机的尖速比和风能利用系数随着雷诺数的增大而增大,但是所有结构形式风力机的静态转矩系数与雷诺数是没有关系的。图 3 中,  $H$  为每节风叶高度之和。

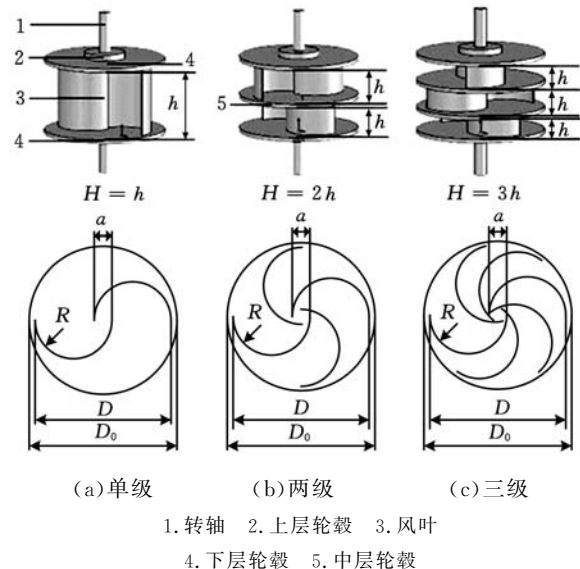


图 3 新型萨布纽斯型风力机原理图

雷诺数表达式为

$$Re = \frac{\rho U D}{\mu} \quad (2)$$

式中,  $U$  为来流速率;  $\rho$  为空气密度;  $D$  为转子直径;  $\mu$  为空气绝对黏度。

阻力型风力机风能利用率低的原因主要是当来流冲击风轮时,在其迎风一侧受到的是有效的推力,而另一侧受到的是阻力,它们的合力才是推动风轮旋转做功的有效力。显然,迎风面另一侧阻力的存在,减小了两者的合力。根据这一原因, Sivasegaram 等<sup>[17]</sup>提出了由静止的导叶和旋转的动叶所组成的导流型垂直轴风力机的雏形,如图 4 所示。导叶可以使来流完全导向受到压力的面,达到提高风能利用率的目的。国内外学者对这种风力机的气动性能进行了研究,结果表明,与传统阻力型相比,其风能利用率有大幅提高<sup>[18-19]</sup>。

由于萨布纽斯型风力机转速和功率都较低,与水平轴风力机相比不适合用来进行风力发电,但是对于小规模电能需求,萨布纽斯型风力机还是大有用途的,所以有必要对其性能进行改进。

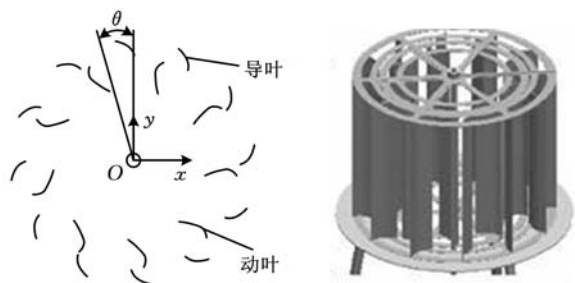


图 4 导流型垂直轴风力机结构示意图

## 1.2 达里厄型风力机

达里厄型风力机由法国工程师达里厄发明,并于 1931 年在美国提出了包括直叶片结构和弯叶片结构的达里厄型风力机专利<sup>[20]</sup>,其结构如图 5 所示。达里厄型风力机分为固定桨距型风力机和可变桨距型风力机。固定桨距型风力机存在启动性能较差的问题,可变桨距型风力机可以解决达里厄型风力机启动转矩过小的问题,但其结构相对复杂。

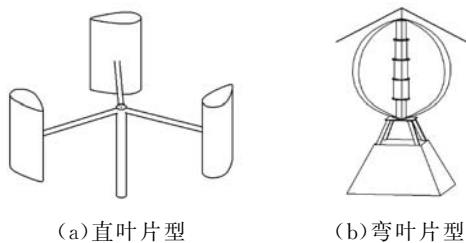


图 5 达里厄型垂直轴风力机

在风速比较大的地区,为了不损坏叶片,垂直轴风力机和水平轴风力机通常是不能正常发电的,于是产生了风能的浪费。为了解决风速限制的技术问题,充分利用超大风电场的风能, Ponta 等<sup>[21]</sup>在传统的达里厄型风力机的基础上设计了变结构椭圆轨道垂直轴风力机,如图 6 所示。传统达里厄型风力机的叶片是围绕中心轴旋转的,而变结构椭圆轨道垂直轴风力机的叶片是安装在小车型的轨道上来回滑动的,电能通过电动机车的椭圆形输电轨道得到。文献<sup>[22-25]</sup>分别对这种类型的风力机的空气动力学、支撑系统和整体结构特性进行了研究。

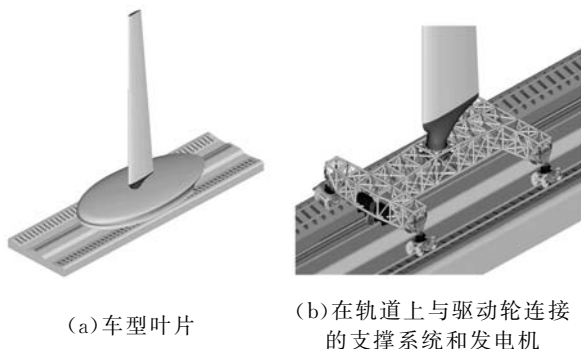


图 6 变结构椭圆轨道垂直轴风力机

## 2 风能利用率改进

### 2.1 风能理论

风能转化率是反映风轮性能的重要参数之一,代表风轮捕捉风能的性能。

尖速比是表示风轮旋转快慢的参数,其计算公式为

$$\lambda = u/v \quad (3)$$

式中, $u$  为叶尖线圆周速度; $v$  为空气风速。

叶片相对速率为

$$v_{rel} = v \sqrt{\sin^2 \theta + (\lambda + \cos \theta)^2} \quad (4)$$

式中, $\theta$  为方位角。

转矩系数为

$$c_t = c_l \sin \alpha - c_d \cos \alpha \quad (5)$$

式中, $c_t$  为转矩系数; $c_l$  为升力系数; $c_d$  为阻力系数; $\alpha$  为迎角。

迎角(攻角)为

$$\alpha = \arctan(\sin \theta / (\lambda + \cos \theta)) - \gamma \quad (6)$$

式中, $\gamma$  为桨距角。

风能转化率为

$$c_p = \frac{1}{2} c_t c v_{rel}^2 \gamma n / (r v^2) \quad (7)$$

式中, $\rho$  为空气密度; $c$  为弦长; $r$  为风机半径; $n$  为叶片数。

### 2.2 性能优化

文献[6]分别从叶片数、扭角( $90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ$ )、偏心系数、风轮高度和旋转直径比例等方面对风力机的性能进行了研究。文献[7]采用  $k-\epsilon$  数学模型,根据偏心系数、封盖直径、内隔板数、螺距 4 个关键参数,对  $180^\circ$  的两叶片螺旋型 S 形风轮进行了优化设计,通过试验确定了以上关键参数的具体数值,通过仿真模拟证明了参数值的可信性。文献[8]对三种典型的叶片重叠比 ( $OL=0, 0.2, 0.5$ ) 的萨布纽斯型风力机进行了验证性的风洞试验,分析了其对风力机性能的影响,进一步将叶片重叠比限定在  $0.15 \sim 0.30$  之间,并对叶片重叠比以及转轴轴径对风力机的静态特性的影响进行了研究,通过试验分析得出了叶片重叠比为  $0.175$  时,风力机的空气动力学性能最佳,图 7 所示为位于日本鸟取大学的风洞试验装置。文献[26]在此基础上又对直叶片型垂直轴风力机不同方位角的静态转矩系数和不同尖速比的动态转矩系数进行了仿真,结果表明,萨布纽斯型风力机改善了直叶片垂直轴风力机的启动性能。

文献[27-29]分别从结构上对萨布纽斯型风力机和达里厄型风力机进行组合,通过两种类型风力机的优势互补,减小了启动转矩,提高了风能利用率。Wakui 等[27]设计了两种结构:将萨布纽

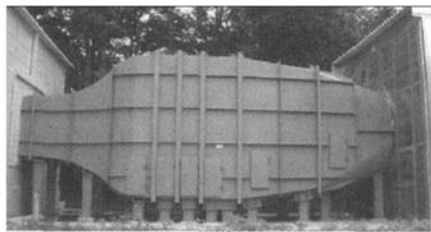


图 7 风洞试验装置

斯型风力机内置于达里厄型风力机中以及将达里厄型风力机内置于萨布纽斯型风力机中,如图 8 所示。通过这两种组合风力机的对比,证明了将萨布纽斯型风力机内置于达里厄型风力机中这一组合设计更为简单,风能利用率也得到显著的提高。Alam 等[29]提出了将达里厄型风力机安装在萨布纽斯型风力机之上,对样机的分析表明了这种结构相对于各自独立的结构有着更好的自启动性能,如图 9 所示。

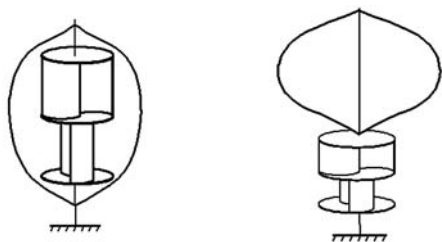


图 8 达里厄型和萨布纽斯型风力机混合组合类型



图 9 萨布纽斯型和直叶片型达里厄风力机的混合类型

## 3 垂直轴风力机关键技术分析

人们以前对垂直轴风力机的共识是风能利用率低和风力机启动性能差。垂直轴风力机在风不够大时无法带动发动机旋转,其原因是高速旋转之下产生了机械摩擦和振动,同时也产生了噪声。运用磁悬浮轴承代替垂直轴风力机的机械轴承,可以使得主轴和轴承转动时减少物理上的接触,以此减小机械摩擦,提高风能利用率和启动性能。

垂直轴磁悬浮风力机启动风速低( $2.5 \sim 25$  m/s)、摩擦损耗小、风能转换效率高,具有巨大的应用潜力[30]。将磁轴承运用到风力机中,既改善了风力机的启动性能,还大大提高了其风能转化效率,同时实现了微噪声,真正实现微风状态发电。

### 3.1 风力发电机

电力系统的并联技术决定了风力发电的演变过程:感应发电机、励磁式同步发电机、直驱式发电机。为了提高发电效率、减小体积,小型垂直轴风力机多使用直驱式永磁发电机。直驱发电机的低速特性需要很大的转矩,要求电机有较多的极数和较大的直径,使得电机内部有很多空间不能充分利用。这就是直驱发电机通常比传统发电机重、经济性差的原因。轴向磁场永磁同步风力机可以改进这些不足之处,Kemper<sup>[31]</sup>对轴向永磁同步发电机的结构、性能等进行了深入研究。该类型电机具有效率高、体积小、重量轻、节能效果明显、故障率低、振动小、噪声低等优点,非常适用于偏远无电但风能资源丰富的地区<sup>[32]</sup>。另外,采用定子斜槽、转子斜极和定子分数槽等方法的永磁同步发电机均可减小起动阻力矩,从而有效地提高风能利用率<sup>[33]</sup>。文献<sup>[34]</sup>对垂直轴永磁同步风力发电系统建模,运用 MATLAB/Simulink 建立了包括风力机模型、传动系统模型和发电机模型在内的系统仿真模型,并且对有功功率、无功功率瞬时控制策略进行仿真,仿真结果验证了该模型的合理性及其控制策略的正确性和可行性。

### 3.2 垂直轴风力机转子支撑系统

(1)机械轴承。这类轴承目前在风力发电机中占据主导地位,但也带来了摩擦严重的问题,特别是对于启动性能不佳的垂直轴风力机而言尤为严重。风力发电机组使用的关键配套轴承包括偏航系统轴承、变桨系统轴承、主轴轴承、其他系统轴承(发电机轴承和齿轮轴承)<sup>[35]</sup>。

(2)电磁轴承。电磁轴承可以分为主动磁轴承、被动磁轴承(永磁轴承)、混合磁轴承。美国国家可再生能源实验室(NREL)和美国能源部在2007年开始启动小型风力机研究项目,并将电磁轴承运用到垂直轴风力机中<sup>[36]</sup>。美国环球风能科技有限公司设计出磁悬浮原理的垂直轴风力机,并实行了商业化。廖界儒等<sup>[37]</sup>将被动磁轴承应用在永磁同步发电机上实现发电,减小了摩擦噪声,延长了元件使用寿命。Liu等<sup>[38]</sup>使用被动磁轴承,可以任意调节叶片浆距以得到最大的迎风角,从而改善了风力机的自启动能力,并且在山东大学风能试验基地对样机做了长期的试验,结果证明了使用永磁轴承的风力机运行状态良好,获得了市场的认可。文献<sup>[39]</sup>和文献<sup>[40]</sup>分别使用 MATLAB 仿真软件建立了轴向磁轴承模型和混合磁轴承模型,并使用有限元软件对轴向磁轴承的结构参数进行径向优化,使得其控制效果实

现了稳定悬浮,可满足小型垂直轴风力机的启动要求。

### 3.3 风能转换系统(WECS)

近年来,风能转换系统逐渐得到各国学者和研究机构的重视<sup>[3-5]</sup>。风电场安装的兆瓦级风力机已占大多数,风力机的电能输出波动直接导致电网频率变化,电网频率的变化又会影响电能质量。因此,解决风力发电的输出波动变化有利于风电场的稳定运行。Takahashi等<sup>[3]</sup>对风能转换技术进行了深入的研究,并提出将飞轮储能系统应用于风能转换技术,利用飞轮储能存储电量,改善了电能质量,并采用计算机仿真软件 PSCAD/EMTDC 将该方法和传统输出滤波控制进行比较分析,证明了该方法对于孤立的小型电网频率稳定性具有明显的效果,使得频率偏差可以控制在理想的范围内。NanChyuan等<sup>[41]</sup>将主动磁轴承运用到风力发电中,提高了能量转换的效率,并在设计的样机中对仿真结果进行了验证。

## 4 需要研究的技术问题

以下是垂直轴风力机需要解决的技术问题,对于具体类型的各种垂直轴风力机在设计上还会出现许多的问题。

(1)风电机组的使用寿命较短。从技术商业化程度来看,难以保证风电机组使用寿命达到20年,因而所有部件的可靠性都需要进行深入研究。这可以通过对风力机系统的优化设计、选用更好的材料和先进的控制装置等措施来实现。

(2)解决恒尖速比这一性能指标是最大限度地利用风能技术的关键所在,不用“软调节环节”而达到提高风能利用率是需要深入研究的问题。

(3)低速比是垂直轴风力机的特点,低转速大功率输出的问题对于垂直轴风力机或水平轴风力机都是一个难题。由于水平轴风力机研究相对成熟,处理的效果要比垂直轴风力机好一些,因此,垂直轴风力机的低转速大功率输出的问题是需要深入研究的关键问题。

(4)目前垂直轴风力机大多属于离网型,如果能开发出性能成熟可靠的并网型垂直轴风力机,将会改变风力机市场的现状。

(5)由于风速随机性变化,产生风电功率的随机波动,加大了电网负荷调节负担,故设计出可以将用电低谷的多余电量储存在高峰时期使用的储能系统,是必须解决的问题。

## 5 结语

本文对垂直轴风力机的类型、原理、结构、风

能利用率等方面进行了详细的综述,剖析了垂直轴风力机存在的若干问题和发展趋势,提出了需要进一步解决的关键技术问题,可以为从事相关研究的学者提供借鉴。总的来说,国外对垂直轴风力发电机的研究和实用已经达到了一定的阶段,但国内的研究水平基本处于起始阶段,还没有大规模应用垂直轴风力机来建设风电场。随着对垂直轴风力机研究的进一步深入,它的综合性能也必将不断得到提高,所以,对垂直轴风力机展开研究,具有重要的理论意义和工程应用价值。

#### 参考文献:

- [1] Eriksson S, Bernhoff H, Leijon M. Evaluation of Different Turbine Concepts for Wind Power[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2008, 12(5): 1419-1434.
- [2] Zhang Lixun, Zhang Song. Study on Synchronous Variable Pitch Vertical Axis Wind Turbine[C]// *Asia Pacific Power and Energy Engineering*. Wuhan, 2011: 1-5.
- [3] Takahashi R, Li Wu, Murata T, et al. An Application of Flywheel Energy Storage System for Wind Energy Conversion[C]// *Proceedings of IEEE International Conference on Power Electronics and Drives Systems*. Kuala Lumpur, 2005: 932-937.
- [4] Takahashi R, Tamura J. Frequency Control of Isolated Power System with Wind Farm by Using Flywheel Energy Storage System[C]// *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*. Vilamoura, 2008: 1-6.
- [5] Takahashi R, Tamura J. Frequency Stabilization of Small Power System with Wind Farm by Using Flywheel Energy Storage System[C]// *Power Electronics and Drive Systems*. Cracow, 2007: 916-923.
- [6] 赵振宙,郑源,周大庆,等. 基于数值模拟 Savonius 风力机性能优化研究[J]. *太阳能学报*, 2010, 31(7): 907-911.  
Zhao Zhengzhou, Zheng Yuan, Zhou Daqing, et al. Optimization of the Performance of Savonius Wind Turbine Based on Numerical Study[J]. *Acta Ener-giae Solaris Sinica*, 2010, 31(7): 907-911.
- [7] 赵振宙,郑源,徐小韵,等. 螺旋形 S 型垂直轴风轮结构优化设计[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(26): 75-78.  
Zhao Zhenzhou, Zheng Yuan, Xu Xiaoyun, et al. Optimum Figuration of Helix S-type Vertical Axis Wind Turbine[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(26): 75-78.
- [8] 李岩,原丰,林农. Savonius 风力机叶片重叠比的风洞实验研究[J]. *太阳能学报*, 2009, 30(2): 226-231.  
Li Yan, Yutaka Hara, Tsutomu Hayashi. A Wind Tunnel Experimental Study on The Overlao Ratio of Savo-nius Rotors[J]. *Acta Ener-giae Solaris Sinica*, 2009, 30(2): 226-231.
- [9] Ushiyama I, Nagai H. Optimum Design Configurations and Performance of Savonius Rotors [J]. *Wind Engineering*, 1988, 12(1): 59-75.
- [10] Rabah K, Osawa B M. Design and Field Testing of Savonius Wind Pump in East Africa[J]. *Int. J. of Amb. En.*, 1996, 17(2): 89-94.
- [11] Twidwell J W, Weir A D. *Renewable Energy Resources*[M]. Cambridge: The University Press Cambridge, 1985.
- [12] Eldridge F R. *Wind Machines*[M]. New York: Van Nostrand, 1980.
- [13] Kirke B K. Evaluation of Self-starting Vertical Axis Wind Turbines for Stand-alone Applications [D]. Brisbane: Griffith University, 1998.
- [14] Menet J L. A Double-step Savonius Rotor for Local Production of Electricity[J]. *Renew Energy*, 2004, 29(11): 1843-1862.
- [15] Kamoji M A, Kedare S B, Prabhu S V. Experiment Investigations on Single Stage, Two Stages and Three Stage Conventional Savonius Rotor[J]. *International Journal of Energy Research*, 2008, 32(10): 877-895.
- [16] Saha U K, Maity T S. Optimum Design Configuration of Savonius Rotor Through Wind Tunnel Experiments[J]. *Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(8/9): 1359-1375.
- [17] Sivasegaram S, Sivapalan S. Augmentation of Power in Slow Running Vertical-axis Wind Rotors Using Multiple Vanes[J]. *Wind Engineering*, 1983, 7(1): 12-19.
- [18] 王企鲲. 导流型垂直轴风力机内部流场数值模拟中若干问题的探讨[J]. *机械工程学报*, 2010, 47(4): 147-154.  
Wang Qikun. Some Aspects on Flow Field Simulation for Guiding VAWT[J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 47(4): 147-154.
- [19] Takao M. A Straight-bladed Vertical Axis Wind Turbine with A Guide Vane Row-effect of Guide Vane Geometry on The Performance[J]. *Journal of Thermal Science*, 2009, 18(1): 54-57.
- [20] Darrieus Gjm. Turbine Having Its Rotating Shaft Transverse to the Flow of the Current: US, 1835081[P]. 1931-12-08.
- [21] Ponta F L, Pont L C. A Novel Technique for

- High-power Electricity Generation in High-speed Wind Regimes[C]//Fifth World Renewable Energy Congress. Florence,1998: 1936-1939.
- [22] Ponta F L, Seminara J, Otero A D. On The Aerodynamics of Variable-geometry Oval Trajectory Darrieus Wind Turbines[J]. Renewable Energy, 2007, 32(1): 35-56.
- [23] Ponta F L, Otero A D. Innovative Concepts In Wind-power Teneration: the VGOT Darrieus [J]. Wind Turbine, 2008,32(1): 137-159.
- [24] Ponta F L, Lago L I. Analysing the Suspension System of Variable-geometry Oval-trajectory Darrieus[J]. Wind Turbines Energy for Sustainable Development, 2008, 2(3): 5-15.
- [25] Otero A D, Ponta F L. On The Structural Behaviour of Variable-geometry Oval-trajectory Darrieus Wind Turbines [J]. Renewable Energy, 2009, 34(3): 827-832.
- [26] Li Yan, Feng Fang, Sheng Maoli, et al. Computer Simulation on The Performance of a Combined-type Vertical Axis Wind Turbine [C]//2010 International Conference on Computer Design and Applications. Qinghuangdao, 2010: 247-250.
- [27] Wakui T, Tanzawa Y, Hashizume T, et al. Hybrid Configuration of Darrieus and Savonius Rotors for Stand-alone Wind Turbine-generator Systems[J]. Electrical Engineering in Japan, 2005, 150(4): 13-22.
- [28] Wakui T, Yamaguchi K, Hashizume T, et al. Effect of Operating Methods of Wind Turbine Generator System on Net Power Extraction under Wind Velocity Fluctuations in Fields[J]. Renewable Energy, 1999, 16(1): 843-846.
- [29] Alam M J, Iqbal M T. Design and Development of Hybrid Vertical Axis Turbine[C]//Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering. St. John's, 2009: 1178-1183.
- [30] 李惠光, 张广路, 周巧玲, 等. 垂直轴磁悬浮风电悬浮系统的模糊滑模控制[J]. 武汉理工大学学报, 2010,32(10): 136-140.
- Li Huiguang, Zhang Guanglu, Zhou Qiaoling, et al. Fuzzy Sliding Mode Control for Vertical Axis Wind Power Generation Suspension System[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2010,32(10): 136-140.
- [31] Kamper J. Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines[M]. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2004.
- [32] 李德孚. 我国离网型风力发电行业发展现状[J]. 可再生能源, 2009, 18(1): 54-57.
- Li Defu. The Status of Wind Power Generation Unconnected to Grid in China[J]. Renewable Energy Resources, 2009, 18(1): 54-57.
- [33] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 1997.
- [34] 杨国良, 李惠光. 垂直轴永磁同步风力发电系统建模及瞬时功率控制策略[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 39-42.
- Yang Guoliang, Li Huiguang. Modeling and Instantaneous Power Control Strategies of VAWT-PMSG Power Generation System Electric Power Automation Equipment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 39-42.
- [35] 陈龙, 杜宏武, 武建柯, 等. 风力发电机用轴承简述[J]. 轴承, 2008(12): 45-50.
- Cheng Long, Du Hongwu, Wu Jianhe, et al. Brief Introduction of Wind Turbine[J]. Bearing, 2008 (12): 45-50.
- [36] Chakraborty S, Kroposki B, Kramer W. Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems[R]. Denver: National Renewable Energy Laboratory, 2008.
- [37] 廖界儒, 吴有基, 林锦垣, 等. 磁浮式永磁同步风力发电机研制[C]//2010年台湾风能学术研讨会. 澎湖, 2010: 149-153.
- [38] Liu Shuqin, Zhong Guobian, Li Deguang, et al. A Magnetic Suspended Self-pitch Vertical Axis Wind[C]//Generator Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, 2010: 1-4.
- [39] Wu Huachun, Wang Ziyang, Hu Yefa. Study on Magnetic Levitation Wind Turbine for Vertical Type and Low Wind Speed[C]//Speed Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, 2010: 1-4.
- [40] Wu Huachun, Wang Ziyang, Hu Yefa. Development of Small Wind Generator Based on Hybrid Magnetic Bearing[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Wuhan, 2009: 884-887.
- [41] NanChyuan T, Chiang Chaowen, Wang Bailu. Enhanced Efficacy of Kinetic Power Transform for High-speed Wind Field[C]//World Academy of Science, Engineering and Technology. Paris, 2010: 603-608.

(编辑 陈勇)

作者简介: 杨益飞,男,1983年生。江苏大学电气信息工程学院博士研究生。研究方向为风力发电技术和磁悬浮传动技术。  
潘伟,女,1977年生。江苏大学电气信息工程学院博士研究生、讲师。  
朱焜秋,男,1964年生。江苏大学电气信息工程学院教授、博士研究生导师。