

小型水平轴变偏心距风力机功率调节方法研究

李常春¹, 包道日娜¹, 冯国英², 赵明智¹, 刘志璋¹

(1. 内蒙古工业大学能源与动力工程学院, 呼和浩特 010051; 2. 武汉工程大学机电工程学院, 武汉 430205)

摘 要: 针对分布式和微电网系统要求小型风力发电机组的发电负荷可调的需要, 提出一种小型水平轴风力机可变频距主动侧偏式功率调节方法, 介绍机构的组成, 分析改变偏心距使风轮侧偏产生机理, 给出偏心距与风轮侧偏角度的表达式。通过改造 1.5 kW 上风向水平轴风力机, 在风洞中进行稳态风的变频距风力机功率输出特性实验, 结果表明该机构可满足水平轴风力机功率调节的主要要求, 为进一步将该机构用于商用小型风力机功率调节奠定了理论和实验基础。

关键词: 小型风力机; 功率调节; 实验; 变偏心距; 风轮侧偏

中图分类号: O325/TK79 **文献标识码:** A

0 引 言

目前, 由风力发电机组成的分布式或微电网系统, 根据系统发供电平衡的特点, 当发电负荷超出用电负荷要求时, 风力机应减少出力即减少输出功率。大型风力发电机组多采用变桨距的方式进行功率调节, 而小型水平轴风力发电机组的功率调节大都在额定风速以下无功率调节, 在额定风速以上进行大风限速保护, 如风轮侧偏、上仰或伞形缩放等。按照国家标准定义, 小型水平轴风力发电机组(以下简称小型风力机)是指一个风轮扫掠面积等于或小于 200 m², 将风能转换为电能的系统^[1]。因此, 应用于分布式或微电网的小型风力机直径≤16 m, 单机容量基本在 100 kW 以下。在这样的风力机尺寸下安装独立的变桨系统, 空间位置不足, 成本也较高。

如何能让小型风力机具备在每个运行风速下均可进行功率调节, 从而满足分布式或微电网的对功率的调度要求显得尤为重要。因此, 在合理利用风轮侧偏的结构的基础上, 本文通过主动控制来调整风轮轴线与回转中心线距离(即偏心距), 提出新的小型风力机变偏心距功率调节方法。风轮主动侧偏机构采用功率或转速信号来调节偏心距的大小, 并控制风轮侧偏的启动和复位。

1 可变偏心距风力机的结构

本文设计的可变偏心距风力机的结构如图 1 所示。风力发电机风轮侧偏控制通过调整偏心距来实现, 在风力机的运行风速范围内, 当需要进行功率调节时, 驱动装置驱动风轮和发电机相对塔架中心偏移, 空气对风轮产生的气动力使风轮绕回转中心向侧面偏转, 在尾舵对风的过程中形成新的平衡。风轮侧偏机构由支撑风轮和发电机的托板、滑轨、驱动机构和尾舵组成。驱动机构包括直流减速电机、蜗轮蜗杆减速机和侧偏控制器。风轮和发电机可在滑轨上移动, 滑轨焊接在托板面上, 托板焊

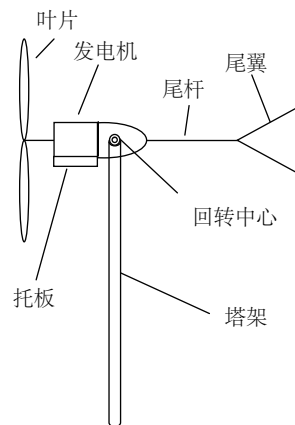


图1 变偏心距风力机结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of HAWT

收稿日期: 2017-11-24

基金项目: “十二五” 国家科技支撑计划(2012BAA06B01)

通信作者: 李常春 (1976—), 男, 博士研究生, 主要从事新能源技术开发利用方面的研究。lichen2006@163.com

接在驱动器外壳上,驱动器外壳与尾舵连在一起。该结构有以下特点:1)无尾翼预偏角,对风性能好;2)无斜角链机构,风轮侧偏角度和尾翼偏转角度一致;3)偏心距主动调节,工作可靠性高。

风力机侧偏控制器的作用是:把用电负荷的实际需要的功率作为目标功率,风力机侧偏控制器检测风力机电流、电压等信号,控制器计算出风力机实时发出的功率,该功率与目标功率进行对比后,将偏心距的数值发送给传动机构,传动机构带动风轮和发电机在滑轨上移动产生偏心距,以使风轮偏离风向,控制器到达相应位置后,控制器再次判断实时功率与目标功率的差距,若二者偏差小于0.05,认为调整的偏心距是合适的,从而达到调节风力机功率的目的。

2 风力机功率调节原理分析

风力机在风速和偏心距的共同作用下,使风轮产生侧偏,形成风轮侧偏力矩和尾舵气动力矩,当二者平衡时,风力机稳定运行在某一侧偏角下。侧偏的风轮改变了风轮的正对风面积,改变了风轮转速,达到调节发电机输出功率的目的。变偏心距侧偏风力机的功率变化的逻辑框图,如图2所示。

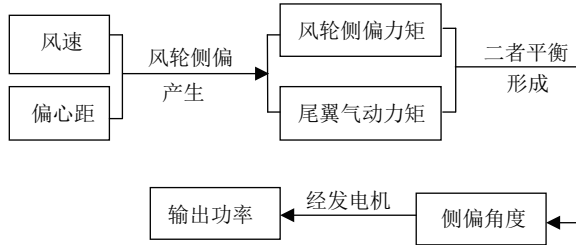


图2 功率变化逻辑图

Fig. 2 Power change logic diagram

需解决2个问题:1)偏心距与侧偏角的关系;2)侧偏角与风力机输出功率的关系。为解决第1个问题,需确定风轮侧偏力矩和尾翼气动力矩的平衡的关系。下面分析该平衡方程式。

3 变偏心距风力机力矩平衡方程的建立

来流风速 v 与风轮形成一侧偏角 θ , 其分别作用在风轮和尾翼上形成了风轮侧偏力矩和尾翼气动力矩,如图3所示。

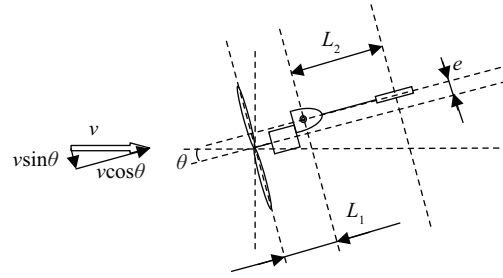


图3 变偏心距风力机力矩示意图

Fig. 3 Moment diagram of HAWT

3.1 风轮侧偏力矩

将来流风速 v 分解成垂直于风轮平面分量 ($v \cos \theta$) 和平行于风轮平面分量 ($v \sin \theta$) 2 个分量^[2], 它们相对于偏转轴分别产生轴向推力与侧向推力。风轮上的轴向推力 F_n 为:

$$F_n = C_t \frac{1}{2} \rho (v \cos \theta)^2 A_n \quad (1)$$

式中, C_t ——轴向推力系数,通常取 8/9; A_n ——风轮扫掠面积, m^2 ; ρ ——空气密度, kg/m^3 。

风轮的侧向力 F_{rs} 为:

$$F_{rs} = C_s \frac{1}{2} \rho (v \sin \theta)^2 A_{rs} \quad (2)$$

式中, C_s ——侧向力系数,通常取 8/9; A_{rs} ——风轮的侧向投影面积, m^2 。

轴向力产生的偏侧力矩 M_n 为:

$$M_n = F_n e = C_t \frac{1}{2} \rho (v \cos \theta)^2 A_n e \quad (3)$$

式中, e ——偏心距(风轮轴线偏离回转中心轴线的距离), m 。

侧向力产生的偏侧力矩 M_{rs} 为:

$$M_{rs} = F_{rs} L_1 = C_s \frac{1}{2} \rho (v \sin \theta)^2 A_{rs} L_1 \quad (4)$$

式中, L_1 ——风轮扫掠面与回转中心轴线的距离, m 。

3.2 尾翼上的气动力

根据空气动力学知识,由于尾翼处在风轮的尾流中,尾翼与来就风向有一夹角 α , 气流作用在尾翼上的气动力 F_v 可用式(5)计算:

$$F_v = C_N \frac{1}{2} \rho v^2 (1-a)^2 A_v \quad (5)$$

式中, C_N ——法向力系数; a ——轴向诱导因子。

F_v 绕偏转轴产生的气动力矩为:

$$M_{sv} = F_v L_2 = C_N \frac{1}{2} \rho v^2 (1-a)^2 A_v L_2 \quad (6)$$

式中, L_2 ——尾翼风压中心到回转中心的距离, m。

3.3 风力机力矩平衡方程式

当风轮相对于塔架有一偏心距时,作用在风轮上的侧偏力矩驱使风轮相对于风向偏转一定角度 θ ,而风轮与尾翼是刚性连接的,相应地尾翼也会相对于风向偏转,故有 $\theta = \alpha$ 。当风轮侧偏力矩和尾翼气动力矩相等时,风力机在侧偏角 θ 下稳定运行。故风力机的平衡方程式为:

$$\frac{1}{2}C_t\rho(v\cos\theta)^2A_n e + \frac{1}{2}C_s\rho(v\sin\theta)^2A_n L_1 =$$

$$C_N\frac{1}{2}\rho v^2(1-a)^2A_n L_2 \quad (7)$$

化简式(7),可得:

$$C_t\cos^2\theta A_n e + C_s\sin^2\theta A_n L_1 = C_N(1-a)^2 A_n L_2 \quad (8)$$

通过式(8),改变偏心距 e 可计算偏转角 θ 。按照式(8)可得出,若偏心距不变,在不同的风速下风力机风轮的侧偏角不变。在实际控制设计中,风轮偏转角可由角度仪直接测量。

4 侧偏角 θ 下风力机功率的理论计算

应用风力机动量理论,当风力机在侧偏角 θ 下运行,假设风力机始终运行在最佳尖速比,即最大风能利用系数状态下,那么风轮在某一侧偏角下的输出功率 P_θ 与未侧偏时的输出功率 P 之间的关系为^[3,4]:

$$P_\theta = P \cos^3\theta \quad (9)$$

5 变偏心距风力机功率调节风洞实验

为验证可变偏心距条件下,风速、偏转角与输出功率的关系,改造一台1.5 kW风力机(广州红鹰公司生产,具体参数见表1),并进行风洞实验。

表1 风力机参数

Table 1 Parameters of the wind turbine

参数	数值	参数	数值
风轮直径/m	3	切入风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	3
叶片数	5	切出风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	20
风轮锥角	0	额定风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	12
风轮倾角	0	额定转速/ $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$	610
尾翼面积/ m^2	0.2	额定功率/kW	1.5
L_1/m	0.265	L_2/m	1.05

5.1 风力机改造方案

将发电机和尾舵从连接部位分开,加入一副可滑动的连接件,一面与发电机固定,一面与尾舵固定,发电机可相对尾舵平移。组装后的风力机如图4所示。



图4 改造组装后的风力机及风洞

Fig. 4 The wind turbine after assembly and wind tunnel

5.2 实验

5.2.1 风洞简介

山东汇丰能源科技公司闭口回流式风洞动力段500 kW,具有3个实验段分别为:6 m×6 m×30 m闭口实验段、4 m×4 m×8.4 m闭口实验段和6 m×6 m×8.5 m开口实验段。本次实验用的是6 m×6 m开口实验段,最大风速可达30 m/s。该风洞于2017年3月通过中国空气动力研究与发展中心低速空气动力研究所验收合格。

5.2.2 测试设备

测试设备采用内蒙古工业大学研制的小型风力发电机测试系统,测试系统包括测试机箱(内部包含了整流器、各种传感器及变送器)、模拟电池负载、数据采集卡和数据采集程序等。

5.2.3 实验内容

1)测试风轮在偏心距为零即风轮未侧偏情况下,各种风速下的风力机输出功率,以验证理论计算结果;

2)测试风轮不同的偏心距下,各种风速下风轮的侧偏角度和风力机输出功率,以验证理论计算结果。

5.2.4 实验结果分析

1)偏心距为零时的风力机的理论功率和实测功率随风速的变化规律

理论上,偏心距为零时,实验所用的风力机在

尾翼的作用下,能够正对风稳定运行。当发电机输出电压保持一定时(本实验为 56 V),理论输出功率与实际功率随风速的增大而增大,理论功率值大于实测功率。

图 5 实验结果显示,风力机在 12 m/s 达到风力机的设计额定功率 1500 W。为验证风力机功率随偏心距的变化情况,本实验首先测试超过额定风速后(13~15 m/s)未进行功率限制时风力机输出功率,便于变偏心距时功率比较。

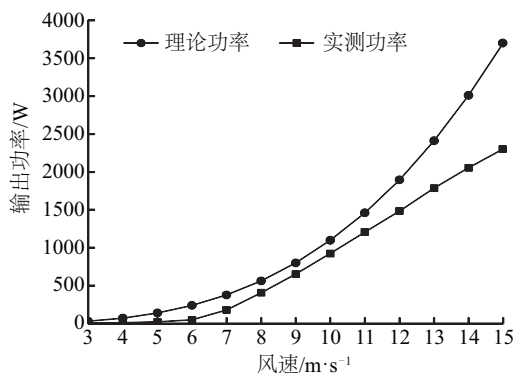


图5 未侧偏时风力机理论、实测功率随风速的变化关系

Fig. 5 Variation of wind speed and power of wind turbine with no eccentricity

2) 偏心距不变时, 风轮侧偏角度随风速的变化规律

由式(8)可得出,风轮侧偏角度取决于偏心距。若偏心距不变,风轮侧偏角度也保持不变。此处对该关系式进行实验验证,结果如图6所示。该实验结果显示,当偏心距为 100 mm(左偏)时,随着风速的逐渐加大,风轮侧偏角度保持在约 42°,变化幅度在 $\pm 3^\circ$,可见式(8)的表达是合理的。

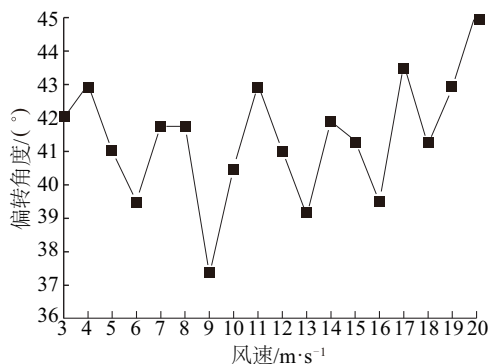
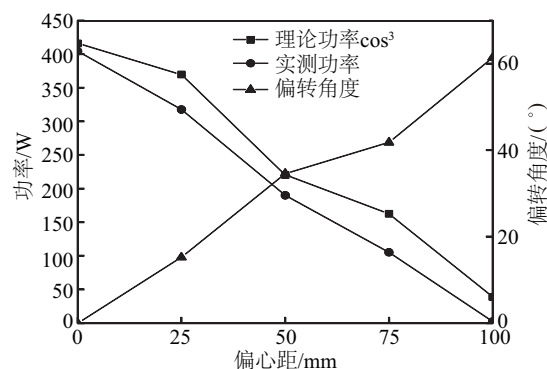


图6 偏心距左偏 100 mm 时风力机偏转角度随风速的变化关系

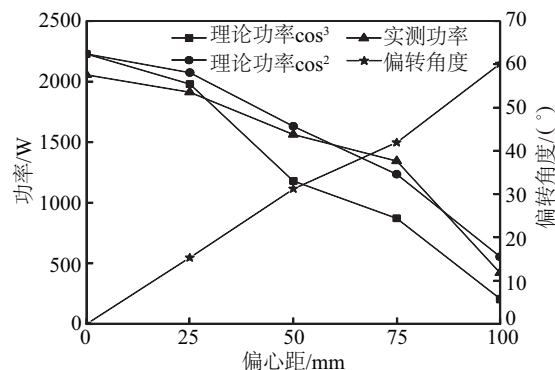
Fig. 6 Variation of the deflection angle with wind speed when the eccentricity is 100 mm

3) 相同风速下, 偏心距变化时, 风力机的侧偏角和输出功率变化情况

实验中,在相同的风速下(风速从 3~20 m/s),偏心距分别为 25、50、75、100 mm 时测量风力机的输出电功率和偏转角度。图 7 为风速分别为 8 和 14 m/s 时的实验结果。



a. 风速 8 m/s



b. 风速 14 m/s

图7 风速为 8、14 m/s 时不同偏心距下的功率和偏转角

Fig. 7 Variation of power and deflection angle with different eccentricity at wind speed 8 and 14 m/s

从实验结果可得出:在额定网速下,按照式(9) \cos^3 关系得出的理论计算功率值大于实测值,但二者变化趋势一致;额定风速以上,理论计算功率值小于实测值,作者按照 $\cos^{2.5}$ 计算得出的理论计算功率大于实测值,变化趋势基本一致。这种理论功率测算的方法可估算输出功率,但是否具有普遍性还需进一步研究。从总的实验结果看,随着偏心距的增大,风轮偏转角越来越大,风力机的输出功率越来越小,实现了同一风速下功率调节的目的。

4) 绕回转轴中心轴不同偏转方向的功率输出分析

实验中,从正对风轮方向看,风轮顺时针旋转,

以回转中心轴(塔架)为中心线,风轮向左手方向移动为左偏,风轮向右手方向移动为右偏,测试偏心距分别为 25、50、75、100 mm,不同风速下的功率输出情况,实验结果如图 8。

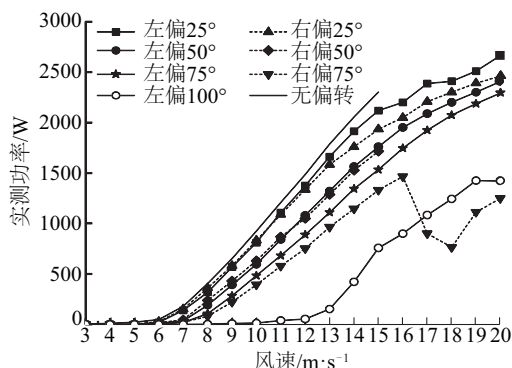


图8 不同偏转方向上风力机的输出功率

Fig. 8 Output power of the wind turbine in different deflection directions

由实验结果可得出,在相同风速下,15 m/s 以下风轮左偏和右偏的输出功率差异不大,但在 16 m/s 以上不同的偏转方向风力机的输出功率有较大差异。在实验过程中还发现,风轮左偏风力机运行平稳,风轮右偏在偏心距为 100 mm 时风力机输出功率不稳定且来回偏转,故图中未画出。这主要是由于风轮旋转方向和偏转方向不同引起的。所以,在设计固定偏心距的风轮侧偏机构时,需注意风轮相对于回转中心轴的位置。

6 结 论

本文提出小型水平轴变偏心距风轮主动侧偏式风力机,实现了小型风力机功率调节的目的,能满足分布式发电或微电网系统电力调度的需要。也是进一步研制新型小型水平轴风力机的基础。从实验中得到的主要结论有:

1)在运行风速下,变偏心距风力机可达到调整

风力机输出功率的目标。

2)偏心距的大小决定了风轮侧偏的角度,风轮侧偏角度可预估风力机的输出功率,控制原理简单,便于风力机控制器设计。

3)变偏心距风力机应用了主动控制,增加了风力机运行的可靠性。

4)固定偏心距式风轮侧偏机构设计时,要注意风轮轴线与回转中心轴的相对位置,最好为面向风轮,若风轮顺时针旋转时,风轮轴线位于回转中心轴的左侧。

[参考文献]

- [1] GB/T 17646-2013/IEC 61400-2:2006, 小型风力发电机组 设计要求[S].
- [1] GB/T 17646—2013/IEC 61400-2: 2006, Design requirements for small wind turbines[S].
- [2] 崔文篆. 小型水平轴被动调速风力机设计与研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2010.
- [2] Cui Wenzhuan. Design and research for small horizontal axis wind turbine with passive speed regulation[D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2010.
- [3] Whale J, Mchenry M P, Malla A. Scheduling and conducting power performance testing of a small wind turbine[J]. Renewable Energy, 2013, 55: 55—61.
- [4] 冯国英. 小型风力发电机大风限速方法的研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古工业大学, 2012.
- [4] Feng Guoying. Over-speed control strategy investigation on small-scale wind turbine[D]. Huhehot: Inner Mongolia University of Technology, 2012.
- [5] Wood D, 郭 靖, 丁永钢, 等. 小型风力机: 分析、设计与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
- [5] Wood D, Guo Jing, Ding Yonggang, et al. Small wind turbines: Analysis, design and application[M]. Beijing: China Machine Press, 2013.

RESEARCH ON POWER REGULATION METHOD OF SMALL HORIZONTAL AXIS WIND TURBINE WITH VARIABLE ECCENTRICITY

Li Changchun¹, Bao Daorina¹, Feng Guoying², Zhao Mingzhi¹, Liu Zhizhang¹

(1. *College of Energy and Power Engineering, Inner Mongolia University of Technology, Huhhot 010051, China;*

2. *School of Mechanical & Electrical Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China*)

Abstract: When small wind turbines are used in distributed power generation system and micro-grid system, the output of the turbines needs to be adjustable. This paper presents a small horizontal axis wind turbine with variable eccentricity mechanism which is used to control power output. The paper analyzes the way to change the eccentricity of the turbine cornering mechanism. An expression of the eccentricity and the furling angle of the turbine is derived. By modifying a 1.5 kW wind turbine, the variable eccentricity mechanism is added between the generator and the tail of the turbine. The power output characteristics are tested in a wind tunnel. The results demonstrated that this method has the high possibility to meet the requirements of the power control of commercial small wind turbines.

Keywords: small wind turbines; power control; experiments; variable eccentricity; furling control of wind turbines