

The Wind Turbine Performance Testing System of Vertical Axis Wind Brushless DC Generator

Xiangyang Zhao, Tianzhong Liu

School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing

Email: zhaoxiangyang@buaa.edu.cn; ares1212@126.com

Received: Oct. 13th, 2011; revised: Nov. 27th, 2011; accepted: Nov. 29th, 2011.

Abstract: In order to achieve the sustainable development of energy and environment, almost every country pops into development of new energy resource. Wind power is one of new energy resource, which has been an advanced subject paid close attention extensively. And off-grid the vertical axis wind turbine system is becoming one of hot issue of wind turbine system researching. In researching vertical axis wind turbine system, researcher needs a testing system supplying the data of experiment to get a new level. The testing system is desgined for a vertical axis wind brushless dc generator. The system could test the of wind tubine perfomance of the vertical axis wind brushless dc generator, and it could get many wind turbine perfomance curves which is the relationship curve between rotated speed and the mechanical power in different conditons. The designer could choose the best design plans and the cut-in wind speed by these curves.

Keywords: The Vertical Axis Wind Brushless DC Generator; Wind Turbine Performance; Virtual Instrument; Testing System

垂直轴无刷直流风力发电机风轮特性测试系统

赵向阳, 刘天中

北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 北京

Email: zhaoxiangyang@buaa.edu.cn; ares1212@126.com

收稿日期: 2011年10月13日; 修回日期: 2011年11月27日; 录用日期: 2011年11月29日

摘要: 为了环境的可持续发展, 世界各国越来越重视新能源的开发与利用。风能就是其中一种被广泛关注并开发的新能源。在风能资源的开发中, 离网型垂直轴风力发电机正逐渐成为研究的热点之一。在研制、设计垂直轴风力发电机的过程中, 需要开发相应的测试系统来提供试验数据参考, 便于风力发电机的进一步研制。本测试系统基于虚拟仪器是针对某型垂直轴无刷直流发电机组而设计的。本系统能够对该垂直轴风力发电机组的风轮特性进行测试, 测试时利用无刷直流电机的特性, 测试出多种不同工况下的风轮特性曲线, 即转速与风轮的机械功率之间的关系曲线。设计者通过该曲线既可以选择最佳的设计工况, 也可以确定切入风速的大小。

关键词: 垂直轴无刷直流风力发电机; 风轮特性; 虚拟仪器; 测试系统

1. 引言

随着垂直轴风力发电机逐步成为当前的研究热点之一, 研究者迫切的需要相应的测试系统能够在研制、设计风机的过程中给予试验数据参考, 以便于进一步的研制工作。本系统就是针对某型垂直轴风力发电机设计的, 目的在于为风机设计者测试出不同工况下的

风轮特性曲线, 即转速与风轮的机械功率输出功率之间的关系曲线。无论是在风机的设计初期, 还是在风机样机的鉴定、评审时, 风轮特性曲线都是能够表征风轮发电能力的必须的重要曲线。设计者通过该曲线可以选择最佳的设计方案, 也可以初步确定出切入风速的大小。

目前, 对于水平轴风力发电系统, 国家、行业内

都有详尽的测试、试验标准；但是，在垂直轴方面，国家、行业内却没有相应的测试、试验标准：按照标准要求，水平轴风力发电机的风轮输出特性可根据叶片的几何尺寸和风轮半径，通过公式来进行计算。然而，在垂直轴风力发电机方面，目前国家、行业内没有相关的试验标准，对风轮特性曲线的获取更没有进行硬性的规范和要求：如文献[1]中针对 300 W、100 W 的垂直轴风力发电机组进行了试验，但是并没有对风轮特性进行测试。但是，缺失风轮特性的测试，就无法说明风力发电系统的效率。这是不适当的。另外一个方面，国家、行业内没有相关的标准提出垂直轴风力发电机的风轮特性的计算方法。设计者在研制垂直轴风力发电机的过程中也总会发现实际试验结果和各种出版物已刊载的某些理论有较大的出入。如文献[2]中对所设计的垂直轴风力发电机组的风轮特性及效率进行了计算，但是其结果与本系统所针对的某型垂直轴风力发电机实际试验所得有一定出入。所以，要想获得真实可信的垂直轴风力发电机的风轮特性曲线，就必须自行进行测试了。

2. 测试原理

本测试系统的目标对象是垂直轴无刷直流电机。测试时，最简单、经济的办法就是利用无刷直流电机的特性来进行测试。因为无刷直流电机与有刷直流电

机一样的外特性，所以在测试时也可以利用直流“有刷”电机的模型来代替无刷直流电机。

2.1. 风轮空载损耗(或空载电流)的测定

直流电动机的机械特性：

$$I = \frac{(U - \Delta U) - E}{R_a} = \frac{(U - \Delta U) - C_e \phi \omega}{R_a} \quad (1)$$

同时，电机转矩为

$$T = C_T \phi I \quad (2)$$

式中， C_e 为电势常数， C_T 为力矩常数， ΔU 为管压降， R_a 为电枢电阻， ω 为电机转速， E 为电机反电势。

电机处于电动机状态时，对应施加电压 $U = 12 \text{ V}$ ， $U = 24 \text{ V}$ ， $U = 36 \text{ V}$ ， $U = 48 \text{ V}$ ，有四条机械特性曲线 $I = f(n)$ ，该曲线为四条直线，如图 1 所示。电机在不同的施加电压下，加速至与空载损耗平衡时会得到四个平衡点： (n_{01}, I_{W01}) ， (n_{02}, I_{W02}) ， (n_{03}, I_{W03}) ， (n_{04}, I_{W04}) 。将四个平衡点连成曲线，就可以得到空载损耗曲线 $I_{W0} = f(n)$ 。该曲线即可表征风轮无风时的空载曲线，其也可以由此根据方程 $T_{W0} = C_T \phi I_{W0}$ 和 $P_{W0} = P_{W0}(n)$ 而得出曲线 $T_{W0} = T_{W0}(n)$ 和 $P_{W0} = P_{W0}(n)$ 。

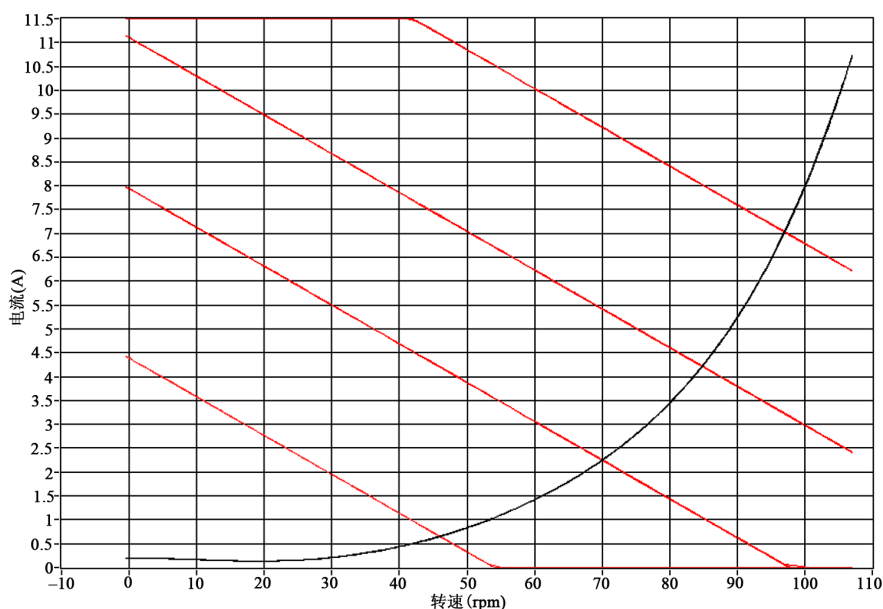


Figure 1. Mechanical characteristic curve and no-load loss curve-Y-axis: current (A), X-axis: rotated-speed (rpm)

图 1. 机械特性曲线与空载损耗曲线——纵坐标：电流(A)，横坐标：转速(rpm)

2.2. 风轮特性曲线的测定

当电机处于发电状态时，有如式(3)的平衡方程：

$$T_w(n) = T_{w0}(n) + T_G(n) + J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} \quad (3)$$

稳态时， $J \frac{2\pi}{60} \frac{dn}{dt} = 0$ ，上式变为：

$$T_w(n) = T_{w0}(n) + T_G(n) \quad (4)$$

式中， $T_w(n)$ 为风轮转矩， $T_{w0}(n)$ 为空载损耗造成的阻转矩， $T_G(n)$ 为发电机电磁力矩且 $T_G = C_T \phi I_G$ 。同理可得到：

$$I_w(n) = I_{w0}(n) + I_G(n) \quad (5)$$

采用电枢电流控制技术，相应给出电磁制动力，达到新的平衡 $\left(\frac{dn}{dt} = 0\right)$ ，测出发电机电流 I_G ，连成曲线 $I_G(n)$ 。该曲线表征风轮扣除风阻之后的净输出，即发电机输出功率。根据该曲线和之前求得的风轮空载损耗曲线就可以得到风轮特性曲线，如图 2 所示。

同时，利用得到的风轮特性曲线，还可以计算出该风力发电机的输出效率：

$$\eta = \frac{P_{G(n)}}{P_{W(n)}} = \frac{P_{W(n)} - P_{W0(n)}}{P_{W(n)}} = \left(1 - \frac{P_{W0(n)}}{P_{W(n)}}\right) \times 100\% \quad (6)$$

3. 测试方案

3.1. 测试系统模型

测试系统模型如图 3。

该垂直轴风力发电机在启动时，先将电机做电动机，通过驱动器由蓄电池供电，将其启动。当电机转速符合要求时，断开蓄电池、驱动器与电机的连接，接入负载，则电机开始向用户发电。

3.2. 系统组成

测试系统需要测量的参数有风机转速、风速、发电机开路电压、负载电压、负载电流、控制线路电流。

对于系统硬件部分，结合实际情况，并参考了多项国内外相关标准^[3-14]的要求选择了合适的传感器，并依据测试所采集信号的特点选择满足要求的数据采集卡。考虑到本套设备应能在野外连续作业，选用了笔记本电脑作为测试系统的上位机。软件部分采用了当前广为使用的图形化编程语言 LabVIEW 来编写测

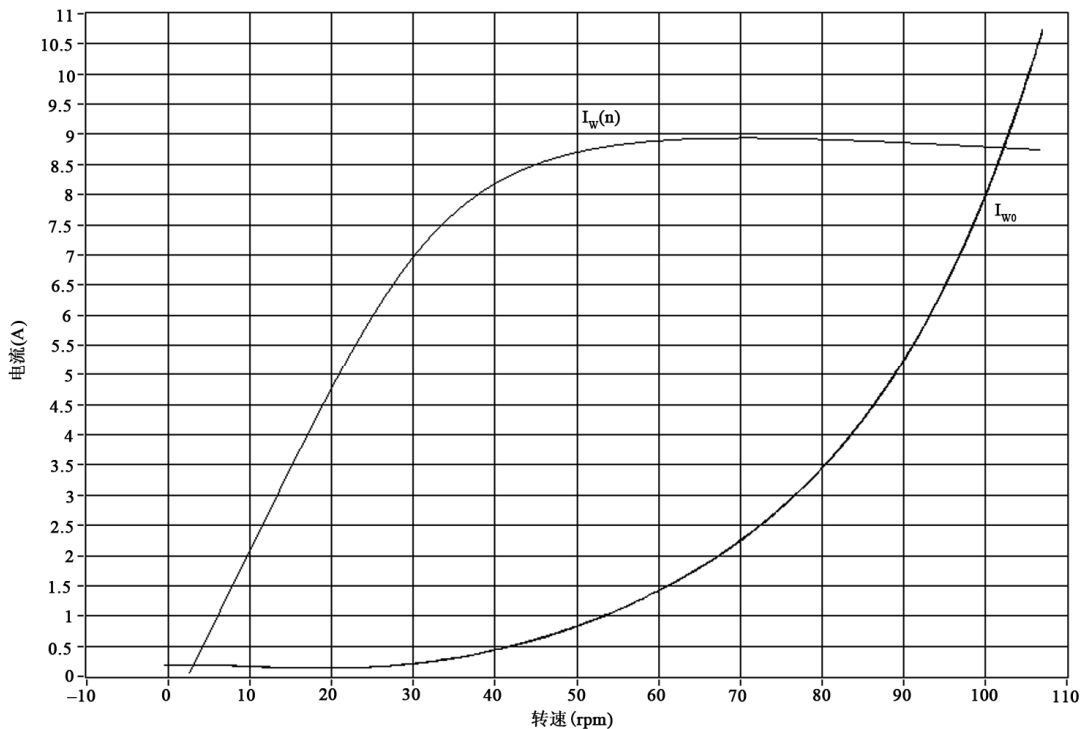


Figure 2. Wind turbine performance curve and no-load loss curve—Y-axis: current (A), X-axis: rotated-speed (rpm)

图 2. 风轮特性曲线和风轮空载损耗曲线——纵坐标：电流(A)，横坐标：转速(rpm)

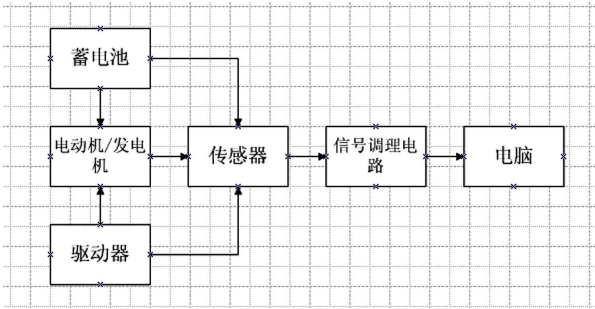


Figure 3. Testing system model
图 3. 测试系统模型

试程序，能够实现对需要测量的各参数的测试、显示和存储。

测试时，各参量通过传感器转换为标准的 $0\text{ V}\sim 5\text{ V}$ 直流电压信号，再经过调理电路进行进一步的处理、滤波，然后通过数据采集卡上传给电脑，实验数据由软件处理后作结果显示，并将测试结果存储于电脑硬盘。

3.3. 测试方案

为了便于结果的对比和分析，一般在试验时将试验分成两种情况来进行：1) 相同风速，不同的风轮设计方案；2) 相同的风轮设计方案，不同的风速。其中，

风轮的设计方案包括风机叶片的数目，风机的实度等参数。在某种既定的工况下，对该垂直轴风力发电机进行测试。完成某种状况后，调整工况，再进行测试，直到获得了满意的，足够进行对比的曲线为止。

测试时，首先根据测量原理，对风机的空载损耗曲线进行测量：先将风机置于电动状态，然后对电机施加电压，待风机处于某个稳定状态后，再进一步施加电压重复上一个过程，直到达到电机额定电压。这个过程结束后，系统会得到一系列稳定点，即会根据所得的一系列稳定点数据拟合出风机的空载曲线，如图 4。

根据上节原理所述，完成上一个步骤后，即在得到风机空载损耗曲线后，在发电状态下，采用电枢电流控制技术对线路电流进行调节，就能得到一系列平衡点，这些平衡点就是平衡时的发电机电流 I_G ，然后与上一步骤一样，系统可以由这些平衡点拟合出曲线 $I_G(n)$ 。该曲线表征风轮扣除空载损耗后的净输出。如上节原理所述，通过先后得到的两条曲线，根据式(5)就可以得到在某种工况下的风轮特性曲线：如图 2 所示的上凸曲线就是风轮特性曲 $I_w(n)$ 。

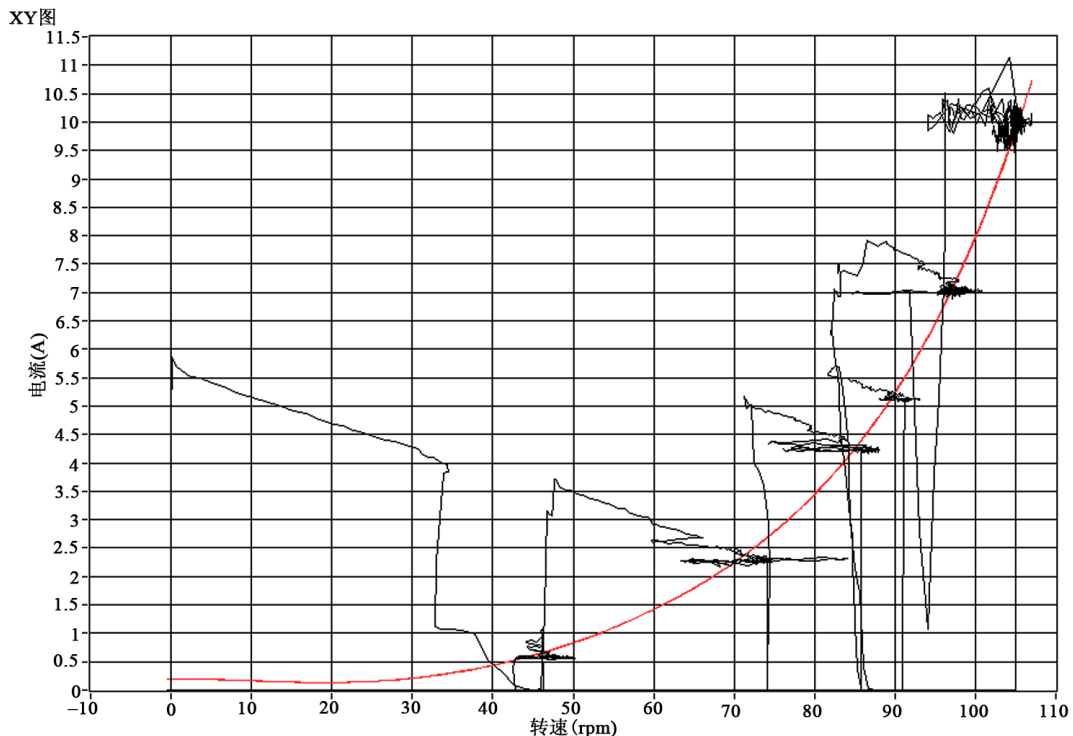


Figure 4. Wind turbine performance and no-load loss curve got in test-Y-axis: current (A), X-axis: rotated-speed (rpm)
图 4. 试验得到的风轮特性曲线和风轮空载损耗曲线——纵坐标：电流(A)，横坐标：转速(rpm)

4. 测试结果与分析

4.1. 结果分析

利用该测试系统对已设计出的垂直轴无刷直流风力发电机进行测试,通过设定不同的工况,可以得到一系列曲线族和在不同工况下的风机效率。通过对该曲线族和效率值进行分析和对比,就可以找到影响风机特性和效率的重要参数,并根据测试结果对风轮的设计进行修正得出最佳设计。以某一测试结果为例:

经过测试得到了如图 5 风轮特性曲线,这组风轮特性曲线说明由上至下为:

$I_{w1}(n)$: 曲线上凸, 有较大的能量输出, 高速段存在有平衡点。

$I_{w2}(n)$: 线性输出, 风机在高速段存在有平衡点, 输出能量较小。

$I_{w3}(n)$: 风轮可以产生一定的动力, 但是曲线全程未与风轮空载曲线相交, 始终无法克服阻力输出电能。

得到以上情形的曲线后, 对于两种提前设定好的情况便会有以下结论和分析:

1) 相同的风速, 不同的风轮设计方案

在这种情况下, 通过对比得到的这几种曲线就能够说明哪一种风轮的设计方案更为优秀。比如通过对比图 4 的几条曲线就可以发现 $I_{w1}(n)$ 所代表的设计方案要比 $I_{w2}(n)$ 的要好, 而 $I_{w3}(n)$ 根本无法完成既定的发电任务。

2) 相同的风轮设计方案, 不同的风速

虽然垂直轴风力发电机相对于水平轴风力发电机有着不需要对风设备的优点, 但其还具有一个明显的缺点: 升力型垂直轴风力发电机的启动力矩很小, 实际上需借助外力才能够启动^[15]。为了风机能够正常启动, 同时为了风机不在实际运行中频繁启动, 需要找到一个适当的切入风速。通过对这种情况下测试出的一系列曲线进行比较, 就可以发现不同风速下风轮发电能力的高低, 就能够直观的找到一个较为适当的切入风速的范围。如果该风速下, 风轮的特性曲线如 $I_{w3}(n)$ 情形, 则说明该风速不适宜启动。但需要说明的是, $I_{w1}(n)$ 所代表的风速并不一定比 $I_{w2}(n)$ 代表的风速更适宜作为切入风速。切入风速的具体选择, 仍需要设计者将风轮特性曲线和风轮空气动力特性或其他设计者需要考虑的系统因素等结合起来一起考虑, 方能够准确的做出判断。

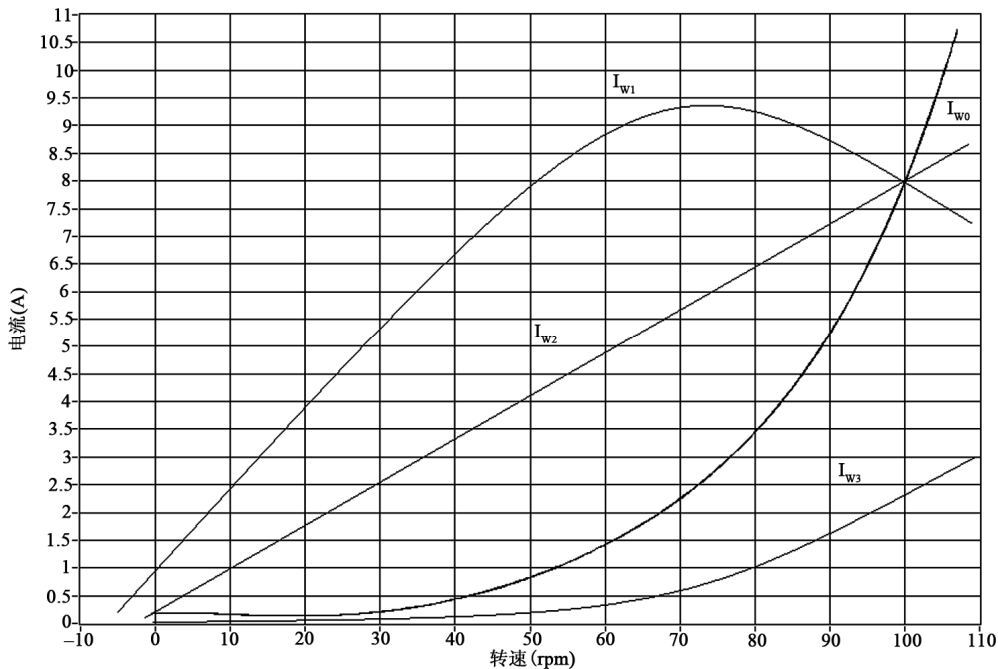


Figure 5. Different wind turbine performance and no-load loss curves got in test, from top to bottom: I_{w1} , I_{w2} , I_{w0} , I_{w3} . Y-axis: current (A), X-axis: rotated-speed (rpm)

图 5. 不同的风轮特性曲线与空载损耗曲线, 由上至下四条曲线分别为风轮特性曲线 I_{w1} 、风轮特性曲线 I_{w2} 、空载损耗曲线 I_{w0} 、风轮特性曲线 I_{w3} ——纵坐标: 电流(A), 横坐标: 转速(rpm)

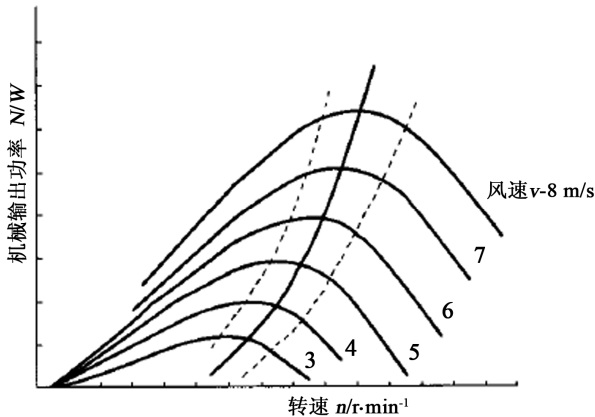


Figure 6. Wind turbine performance curve in “GB-T 19068.1-2003 off-grid wind turbine system”

图 6. 《GB-T 19068.1-2003 离网型风力发电机组》图 5 所示水平轴风轮特性曲线



Figure 7. Operating workbench
图 7. 工作台照片

4.2. 与水平轴风机的风轮特性曲线比较

综上所述，本系统可得到所测试的垂直轴风力发电机的风轮特性曲线。那么，它与一般的水平轴风轮特性曲线有什么区别呢？不同的水平轴风机得到的风轮特性可能千差万别，为了有一定的普遍性，本文选取《GB-T 19068.1-2003 离网型风力发电机组》中图 5 所示风轮特性曲线与本文图 5 中 $I_{w1}(n)$ 表征的风轮特性曲线进行一下简单的比较：

图 6 所示的这一曲线族就是《GB-T 19068.1-2003 离网型风力发电机组》中所示的水平轴风力发电机的风轮特性曲线。定性的可看出，该曲线与本文图 5 中 $I_{w1}(n)$ 表征的风轮特性曲线大体相仿。对比两种风轮特性曲线，可以得到以下结论：

虽然由于垂直轴风力发电机和水平轴风力发电机的原理不同，使得对它们的风轮特性的测试方法不同，但是无论水平轴风力发电机还是垂直轴风力发电机，一个成功的设计方案、一个可以投入运行的风机的风轮转速与风轮的机械功率输出功率之间的关系曲线也就是风轮特性曲线都应该具有相似的特点：1) 相对于风机空载特性曲线，风轮特性应该具有上凸的曲线，这样才会有较大的能量输出。2) 该风轮必须在每种风速下的相对高速段存在有平衡点。

5. 结论

系统通过了系统联调和外场试验，工作台照片见图 7。经实践证明本系统操作简单，经济性好，可取代手动测试系统，且整套系统工作稳定、可靠。测试结果显示测试系统符合各项指标要求，能够通过测试各项参数，绘制垂直轴风力发电机风轮特性曲线。总之，基于 LabVIEW 的垂直轴风力发电机风轮特性测试系统，是将虚拟仪器技术、传感器技术、计算机技术的结合，能够为垂直轴风力发电系统提供了合理、准确的相关数据，使整个风力发电系统的研究和改进的过程效率更高。

参考文献 (References)

- [1] 孙云峰. 小型垂直轴风力发电机组的设计与实验[D]. 内蒙古农业大学, 2008.
- [2] 王超等. 小型垂直轴风力发电机风轮效率的试验研究[J]. 中国机械工程, 2009, 20(18): 2186-2189.
- [3] GB-T 20320-2006. 风力发电机组电能质量测量和评估方法[S].
- [4] GBT 22516-2008. 风力发电机组噪声测量方法[S].
- [5] GB-T 18451.2-2003. 风力发电机组功率特性试验[S].
- [6] GB-T 29001[1].53-2001. 风力发电机组电术语[S].
- [7] GB-T 199601[1].1-2005. 风力发电机组 1 通用技术条件[S].
- [8] GB-T 199601[1].2-2005. 风力发电机组 2 通用试验方法[S].
- [9] JB-T 71431[1].1-93. 风力发电机组用逆变器技术条件[S].
- [10] JB-T 7323-1994. 风力发电机组 试验方法[S].
- [11] GB-T 19068.1-2003. 离网型风力发电机组第 1 部分: 技术条件[S].
- [12] GB-T 19068.2-2003. 离网型风力发电机组 第 2 部分 试验方法[S].
- [13] IEC61400-12. Wind turbine power performance testing.
- [14] IEC61400-11. Acoustic noise measurement techniques.
- [15] 郭新生. 风能利用技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2007: 87-89.