

引用格式:孙云峰,韩巧丽,徐宝清,等.风电机组风洞测试的阻塞效应分析[J].科学技术与工程,2019,19(5):150-153

Sun Yunfeng, Han Qiaoli, Xu Baoqing, et al. Analysis of clogging effect in wind tunnel test of wind turbine[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(5): 150-153

风电机组风洞测试的阻塞效应分析

孙云峰¹ 韩巧丽^{1*} 徐宝清² 乌云达来³ 王英涛³ 李汪灏³

(内蒙古农业大学能源与交通工程学院¹,呼和浩特010018;内蒙古工业大学信息工程学院²,呼和浩特010000;内蒙古农业大学机电工程学院³,呼和浩特010018)

摘要 风洞测试具有方便、快捷和高效的优势,在风电机组输出功率特性测试中应用较多。测试风轮直径较大时,由于存在风洞堵塞效应,会对测试结果造成影响。以300 W风电机组作为研究对象,分别采用风洞测试和车载测试进行输出功率特性测试。测试过程采用负载法,分别以电阻和蓄电池作为负载进行测试。在风洞截面为3 m×3 m的试验段中测试。机组空载启动风速为4.3~4.8 m/s;以电阻为负载时的额定风速为6.2 m/s;在车载测试中,机组空载启动风速为5.7~6.2 m/s,以电阻为负载时的额定风速为8.1 m/s。风洞测试比车载测试的启动风速低1.4 m/s,占车载测试启动风速的24.6%,比车载测试额定风速低1.9 m/s,占车载测试额定风速的23.5%。风轮直径2.3 m,其扫掠面积占风洞试验段截面面积的46.2%,风洞的堵塞效应较大,致风洞测试数据与车载测试数据相差较大,因此风洞测试后需要修正。

关键词 风力发电 负载法 风洞测试 车载测试

中图法分类号 TK83; **文献标志码** B

小型风电机组应用广泛。对于新设计的风电机组,需要通过检验该风电机组的功率和效率来验证风电机组设计是否合理、性能是否可靠^[1,2]。在评估小型风电机组性能的众多指标中,功率特性尤为重要。

风洞测试、车载测试和现场测试是风电机组的输出功率特性测试的有效方法。风洞测试^[3]是把测试用的风电机组安装到风洞的试验段中进行测试。风洞测试具有方便、快捷和高效的优势,对风力发电机的输出功率特性测试^[4],以及对风力机叶片的气动特性测试有显著作用^[5,6]。但是风洞洞壁气流边界层的干扰,以及模型支撑结构对流场的影响,均会对测试结果造成影响,因此需要对风洞测试数据进行修正。其中,自然风场现场测试可以真实地反映机组功率特性,但是现场测试所需时间长,且风况环境不可控。而车载测试在内蒙古地区应用广泛,通过将风电机组安装到客货车上,车辆行驶模拟自然风,得到风速以及相对应的功率^[7-9]。

通过对300 W风电机组进行风洞测试和车载测试,得到300 W风电机组在两个测试中的输出功

率与风速的对应关系,通过比较分析得出风电机组进行风洞测试时阻塞效应的影响。

1 风洞测试与风电机组功率

1.1 模型阻塞面积比

阻塞面积比是指测试模型在测试风洞试验段截面上的迎风面积与该截面面积之比。当阻塞面积比较大时,洞壁干扰量随之增大,导致风洞测试结果偏差增大。为了不使模型阻塞变得很严重,一般限制模型的迎风面积最大不超过试验段截面面积的4%~5%^[10]。风电机组输出功率特性测试时,定义阻塞面积比是指测试风轮在测试风洞试验段截面上的扫掠面积与该截面面积之比。

1.2 功率曲线测定

功率曲线是指风电机组输出功率和风速的对应曲线,是描绘风电机组净电功率输出与风速的函数关系图。对测试得到的风速、功率信号进行初步处理后根据比恩法绘成功率曲线。

1.3 比恩法

比恩法首先需将风速按大小划分为一个个小区间,称为风速比恩。然后将每一比恩中的风速、功率分别求平均值,得到对应点(v_i, p_i),即:

$$v_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} v_{ij} \quad (1)$$

$$p_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} p_{ij} \quad (2)$$

2018年9月30日收到 内蒙古自然科学基金(2017MS0515)资助
第一作者简介:孙云峰(1980—),男,汉族,内蒙古鄂尔多斯人,硕士,讲师。E-mail:yun157@126.com。

*通信作者简介:韩巧丽(1976—),女,汉族,内蒙古包头人,博士,副教授。E-mail:nmgtynxh@hotmail.com。

式中, n_i 为第 i 个比恩中数据对数; v_i 为第 i 个比恩的平均风速; p_i 为第 i 个比恩的平均功率; v_{ij} 为第 i 个比恩中第 j 个平均风速; p_{ij} 为第 i 个比恩中第 j 个平均功率。

用一条平滑的曲线将点 (v_i, p_i) 连起来, 即得到比恩法建模的功率曲线。

2 300 W 风电机组输出功率测试分析

2.1 测试对象

300 W 小型风电机组, 风轮直径 2.3 m, 额定电压 28 V, 蓄电池 12 V、2 块。使用设备有:DYYZ—F 型遥测风速风向仪, CAT III 600 V 具有温度和频率测量功能的数字万用表等。

2.2 风洞测试

华北电力大学风洞测试室, 洞体全长为 151.2 m, 收缩比为 6.25, 低速试验段 3 m(宽) \times 3 m(高) \times 20 m(长) 最高风速 35 m/s。由洞体、动力系统、控制系统、数据采集系统、测试仪器等部分组成。

将测试用的木芯复合材料叶片安装到轮毂上, 调试三个叶片的相互夹角相同之后再紧固^[8], 形成测试用的风轮。将风轮安装到 300 W 发电机上, 连接 24 V 蓄电池或若干电阻, 阻值共 81.5 Ω, 形成风力发电系统。300 W 风电机组在风洞试验段的安装如图 1 所示。

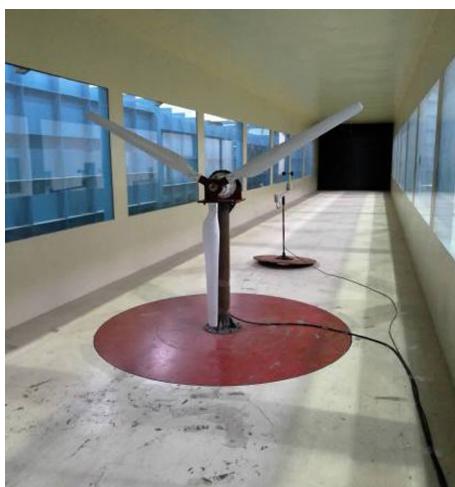


图 1 300 W 风电机组风洞测试

Fig. 1 Wind tunnel test of 300 W wind turbine

测试时间为 2017 年 1 月 17 日 10 点, 气温为 8 ℃, 当地大气压力为 102 672 Pa, 当地空气密度为 1.264 kg/m³。

以电阻为负载的风电机组, 共进行 2 次测试, 风电机组的空载启动风速为 4.8 m/s, 以 10 s 为时间间隔, 通过电流表和电压表进行数据记录。风电机

组输出功率测试流程图^[11]如图 2 所示。

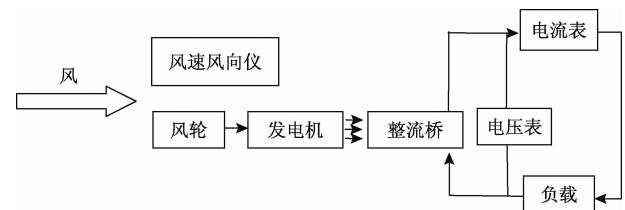


图 2 300 W 风电机组输出功率测试流程图

Fig. 2 Output power test flow chart of 300 W wind turbine

以蓄电池为负载的风电机组, 共进行 2 次测试, 风电机组的空载启动风速为 4.3 m/s, 以 10 s 为时间间隔, 通过电流表和电压表进行数据记录。

2.3 车载测试

车载测试同样将测试用的风轮安装到 300 W 发电机上, 连接 24 V 蓄电池或若干电阻, 阻值共 81.5 Ω, 形成风力发电系统。车载测试具体安装如图 3 所示。



图 3 300 W 风电机组车载测试

Fig. 3 Vehicle test of 300 W wind turbine

测试地点为呼和浩特金桥开发区往和林格尔县的公路上。测试时间为 2017 年 1 月 15 日 13 点 30 分, 气温为 3 ℃, 当地大气压力为 88 766 Pa, 当地空气密度为 1.133 kg/m³, 自然风速范围为 1.5 ~ 3 m/s, 车辆行驶方向与风向方向夹角保证在 10° 范围之内。

以电阻为负载的风电机组, 共进行 2 次测试, 风电机组的空载启动风速为 5.7 m/s, 以 10 s 为时间间隔, 通过电流表和电压表进行数据记录。

以蓄电池为负载的风电机组, 共进行 2 次测试, 风电机组的空载启动风速为 6.2 m/s, 以 10 s 为时间间隔, 通过电流表和电压表进行数据记录。

3 测试结果与分析

测试数据采用比恩法进行了处理。为了有效对比不同地区风力发电机的性能,需要将风电机组的输出功率进行修正,修正为 15°C ,1个标准大气压,空气密度为 1.225 kg/m^3 时的功率值。

风洞测试中,300 W 风电机组的风轮扫掠面积占风洞截面面积的46.2%。300 W 风电机组以电阻和蓄电池为负载进行测试,其修正后的测试结果如图4所示。以电阻为负载时,风速达到4.8 m/s时风电机组空载启动,风速达到6.2 m/s时风电机组达到额定功率;以蓄电池为负载时,风速达到4.3 m/s时风电机组空载启动,风速提高到6.1 m/s时,风电机组达到额定功率。

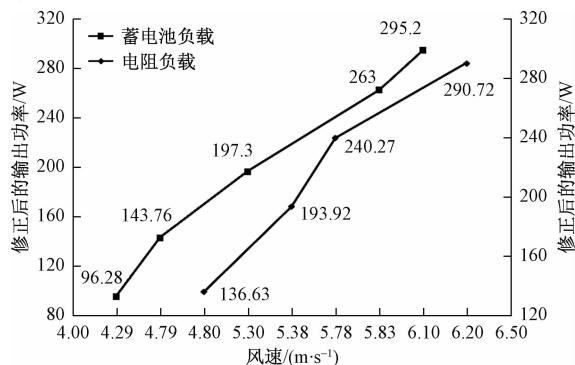


图4 风洞测试输出功率特性曲线

Fig. 4 Output power characteristic curve in wind tunnel test

图5为300 W 风电机组以电阻为负载进行车载测试时,修正后的测试结果。风速达到5.7 m/s时风电机组空载启动,随着车速的提高,风速达到8.1 m/s时,风电机组达到额定功率。

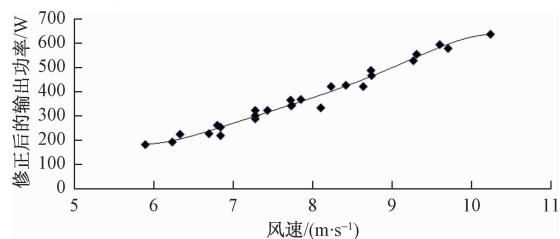


图5 车载测试电阻负载输出功率特性曲线

Fig. 5 Output power characteristic curve under resistance load in vehicle test

图6为300 W 风电机组以蓄电池为负载进行测试时,修正后的测试结果。风速达到6.2 m/s时风电机组空载启动,随着车速的提高,风速达到7.9 m/s时,风电机组达到额定功率。

4 结论

通过对300 W 风电机组进行风洞测试与车载

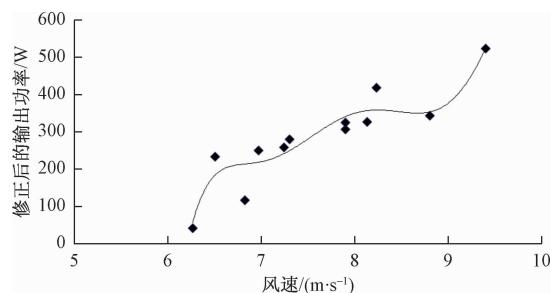


图6 车载测试蓄电池负载输出功率特性曲线

Fig. 6 Output power characteristic curve under battery load in vehicle test

测试,并对测试结果进行对比分析,得到以下结论:

(1)300 W 风电机组在进行风洞测试和车载测试时的启动风速和达到额定功率时的风速是不同的。在风洞测试中,风电机组启动风速为4.3~4.8 m/s,以电阻为负载时,风速达到6.2 m/s时风电机组达到额定功率;在车载测试中,风电机组启动风速为5.7~6.2 m/s,同样以电阻为负载时,风速达到8.1 m/s时风电机组达到额定功率。

(2)300 W 风电机组进行车载测试时,流场空间接近实际,塔架支撑干涉大,影响了流场的几何相似。风电机组运动时产生相对运动流速,流向稳定。与风洞测试的相似之处在于,流场稳定,流速可调,无机组堵塞效应。

(3)300 W 风电机组功率特性测试中,风洞测试比车载测试时的启动风速低1.4 m/s,占车载测试启动风速的24.6%;以电阻为负载时,到达额定功率时的风速比车载测试时达到额定功率时的风速低1.9 m/s,占车载测试额定风速的23.5%。风轮直径为2.3 m,其扫掠面积占风洞截面面积的46.2%,风洞堵塞效应较大,致使风洞测试数据与车载测试数据相差较大,因此选择风洞测试后需要进一步通过现场测试进行修正。

参 考 文 献

- 海风. 风力机讲座 第五讲 风力机的现场测试和风洞试验 [J]. 太阳能学报, 1991(4): 16-20
Hai Feng. Wind turbine lecture fifth wind turbine test and wind tunnel test [J]. Solar Energy, 1991(4): 16-20
- 包道日娜, 常征, 代文平, 等. 基于IEC标准的小型风力发电机功率特性测试数据处理方法的研究 [J]. 可再生能源, 2014, 32(5): 649-654
Bao Daorina, Chang Zheng, Dai Wenping, et al. Research on data processing method for power performance measurements of small wind turbine based on IEC standard [J]. Renewable Energy Resources, 2014, 32(5): 649-654
- 刘国光, 武志伟, 徐有华. 考虑群体效应的高层建筑风力发电可行性风洞试验研究 [J]. 科技通报, 2015, 31(11): 181-185
Liu Guoguang, Wu Zhizhen, Xu Youhua. Consideration of group effect of high-rise building wind power generation feasibility wind tunnel test research [J]. Science Bulletin, 2015, 31(11): 181-185

- Liu Guoguang, Wu Zhiwei, Xu Youhua. Wind tunnel test study on the feasibility of high-rise building wind power generation considering group effect [J]. Bulletin of Science and Technology, 2015, 31 (11): 181-185
- 4 辛海升, 田德, 陈松利, 等. 600 W 浓缩风能型风力发电机输出特性测试与研究[J]. 太阳能学报, 2013(10): 1720-1723
- Xin Haisheng, Tian De, Chen Songli, et al. Experiment and study on output characteristics of 600 W concentrated wind energy turbine [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013(10): 1720-1723
- 5 缪仁豪. 海岛小型垂直轴风力机气动性能的研究[D]. 天津: 天津大学, 2017
- Miao Renhao. Research on aerodynamic performance of small vertical axis wind turbine on islands[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017
- 6 霍玉雷. 低噪高效碟形风力机气动性能研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2016
- Huo Yulei. Study on aerodynamic performance of dish shaped wind turbine with low noise and high efficiency[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2016
- 7 韩巧丽, 田德, 王海宽, 等. 浓缩风能型风力发电机相似模型流场特性试验——车载法试验与分析[J]. 农业工程学报, 2007 (1): 110-115
- Han Qiaoli, Tian De, Wang Haikuan, et al. Test of flow field characteristics of the resembled model of concentrated wind energy turbine outside truck-mounted test and analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007(1): 110-115
- 8 赵丹平. 风力发电机组叶片模型气动载荷研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2009
- Zhao Danping. Aerodynamic load experiment of wind turbine blade model[D]. Hohhot: Inner Mongolia Agricultural University, 2009
- 9 谢园奇. 不同翼型风电机组风轮叶片的气动设计与模拟实验[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2009
- Xie Yuanqi. The aerodynamic design and simulation experiment of different airfoil wind turbine blades[D]. Beijing: North China Electric Power University (Beijing), 2009
- 10 伍荣林, 王振羽. 风洞设计原理[M]. 北京: 北京航空学院出版社, 1985
- Wu Ronglin, Wang Zhenyu. Principle of wind tunnel design[M]. Beijing: Beihang University Press, 1985
- 11 李明, 田德, 王海宽, 等. 变桨距风力发电机组叶片模型的载荷测试实验[J]. 太阳能学报, 2013(9): 1574-1578
- Li Ming, Tian De, Wang Haikuan, et al. Load test experiment of variable pitch wind turbine rotor blade model[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2013(9): 1574-1578

Analysis of Clogging Effect in Wind Tunnel Test of Wind Turbine

SUN Yun-feng¹, HAN Qiao-li^{1*}, XU Bao-qing², WUYUN Da-lai³, WANG Ying-tao³, LI Wang-hao³

(College of Energy and Transportation Engineering, Inner Mongolia Agricultural University¹, Hohhot 010018, China;

College of Information Engineering, Inner Mongolia University of Technology², Hohhot 010000, China;

College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University³, Hohhot 010018, China)

[Abstract] Wind tunnel test has the advantages of convenience, speed and efficiency, and is widely used in wind turbine power characteristics test. When the diameter of the test rotor is large, the test results will be affected by the clogging effect of wind tunnel. The 300 W wind turbine was used as the research object, and the output power characteristics test was performed using the wind tunnel test and the vehicle test respectively. The test process used a load method with resistance and the battery as the load. The test was carried out in a test segment with a wind tunnel section of 3 m × 3 m. The no-load starting wind speed of wind turbine is 4.3 ~ 4.8 m/s. The rated wind speed when the resistance is the load is 6.2 m/s. In the vehicle test, the wind turbine's no-load starting wind speed is 5.7 ~ 6.2 m/s, and the rated wind speed when the resistance is the load is 8.1 m/s. The starting wind speed of the wind tunnel test is 1.4 m/s lower than that of the vehicle test, accounting for 24.6% of the starting wind speed of the vehicle test, and the rated wind speed of the wind tunnel test is 1.9 m/s lower than that of the vehicle test, accounting for 23.5% of the rated wind speed of the vehicle test. The diameter of the rotor is 2.3 m, and its swept area accounts for 46.2% of the cross-sectional area of the wind tunnel test section. The clogging effect of the wind tunnel is large, which results in a large difference between the wind tunnel test data and the vehicle test data. so it needs to be corrected after the wind tunnel test.

[Key words] wind power generation load method wind tunnel test vehicle test