

基于SIMULINK的风力机发电效率建模探究

段洪翔, 郑普, 刘沁

上海理工大学能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2024年4月21日; 录用日期: 2024年5月22日; 发布日期: 2024年5月30日

摘要

随着我国社会经济的发展, 由化石引发的环境污染问题愈发严重, 为解决这一问题, 我国调整能源战略, 着重发展可再生能源, 其中风能为主要代表。由于风能应用广泛, 技术也日益成熟, 本文主要围绕风速对发电功率的影响展开研究, 选用厂家提供的中小型发电机, 充分利用其机动性强便于安装等特点, 研究在深圳气象环境下的发电效率, 利用SIMULINK模拟软件建立风力发电系统, 模拟风力机发电效率。

关键词

风能, 风力发电, SIMULINK建模

Research on the Modeling of Wind Turbine Power Generation Efficiency Based on SIMULINK

Haoliang Duan, Pu Zheng, Qin Liu

School of Energy and Powering Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Apr. 21st, 2024; accepted: May. 22nd, 2024; published: May. 30th, 2024

Abstract

With the development of the social economy, the environmental pollution caused by fossils has become more and more serious, to solve this problem, China adjusted its energy strategy and focused on the development of renewable energy, of which wind energy is the main representative. Due to the wide application of wind energy, the technology is also increasingly mature, this paper mainly focuses on the impact of wind speed on power generation power to carry out research, the selection of small and medium-sized generators provided by manufacturers, making full use of its strong mobility and easy to install and other characteristics, study the power generation efficiency

in the meteorological environment of Shenzhen, the use of SIMULINK simulation software to establish a wind power generation system, simulating the efficiency of wind turbine power generation.

Keywords

Wind Energy, Wind Power Generation, SIMULINK Modeling

Copyright © 2024 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着人类社会的进步,科技的发展,人口的增加,资源利用量也大幅增长,化石能源的大量开采引发了一系列的环境污染和资源短缺问题。国民经济发展的同时对能源需求不断提高,我国政府调整能源利用结构,大力开发可再生能源,减少传统化石能源的开采。可再生能源属于绿色能源,天然生成,使用过程中也无害无污染,现在被广泛应用的有太阳能、风能、地热能和潮汐能等。

这些可再生能源虽然都是无穷无尽的,但是目前还难以实现高效利用,因此要想改善生态环境,解决全球变暖等环境问题的同时实现社会的可持续健康发展,必须重视可再生能源的结构开发和更高效的利用技术[1]。其中风能资源具有储量大、能量密度低和波动大的明显特点。风能可以在实际应用中的各个领域中使用,比如它可以直接在生产中用作电源,也可以转换成高级能量(例如电能)使用。

其中,风能的主要利用方式是风力发电。风力发电的效率不仅受风力资源的影响,而且还与风力发电机的机组性能有关。2021年11月,风力发电装机容量再创佳绩。2021年1~11月,中国风力发电装机容量30486万千瓦,同比增长29.0%。2021年1~11月风电新增发电装机容量2470万千瓦。在双碳战略背景下仍维持高景气度,预计风电新增装机容量将持续增长[2]。

良好的风轮功率输出特性是风力发电机组的设计中最终追求的一个目标,而影响风轮输出功率的因素很多,其中风速的变化对风机功率的影响占主要因素。在一定范围内,随着平均风速的增加,风电机组的发电功率就随之增大,但平均风速过大则会导致风电机组出现故障概率上升,从而不能获得更大发电量。由于风速 v 是由大自然所决定的,因此不好控制比较随机,且功率与风速的三次方成正比[3]。此次选用小型风力机,仅用于维持家用部分电器的日常工作,对此,此次论文主要研究目的是风速对风轮输出功率的影响,同时小型风力机小巧方便运输可用于偏远地区,对解决用电难问题,具有重要的理论意义和实际意义。由于风机参数各式各样,此工作选用的型号为FD7.0-10KW风力发电机。

2. 风力机发电原理

2.1. 风力发电机的原理和结构

2.1.1. 风力机原理

风力发电机是一种将风能转换为电能的能量转换装置。发电过程:空气以一定风速作用在风力机风轮上,推动风轮旋转起来,将空气所具有的动能转变成风轮的机械能,风轮的轮毂固定在风力发电机的机轴上,通过传动系统驱动发电机轴及转子旋转,最终发电机将机械能转变为电能输送给电力系统[4]。

图1是一种水平轴风力机结构组成图。

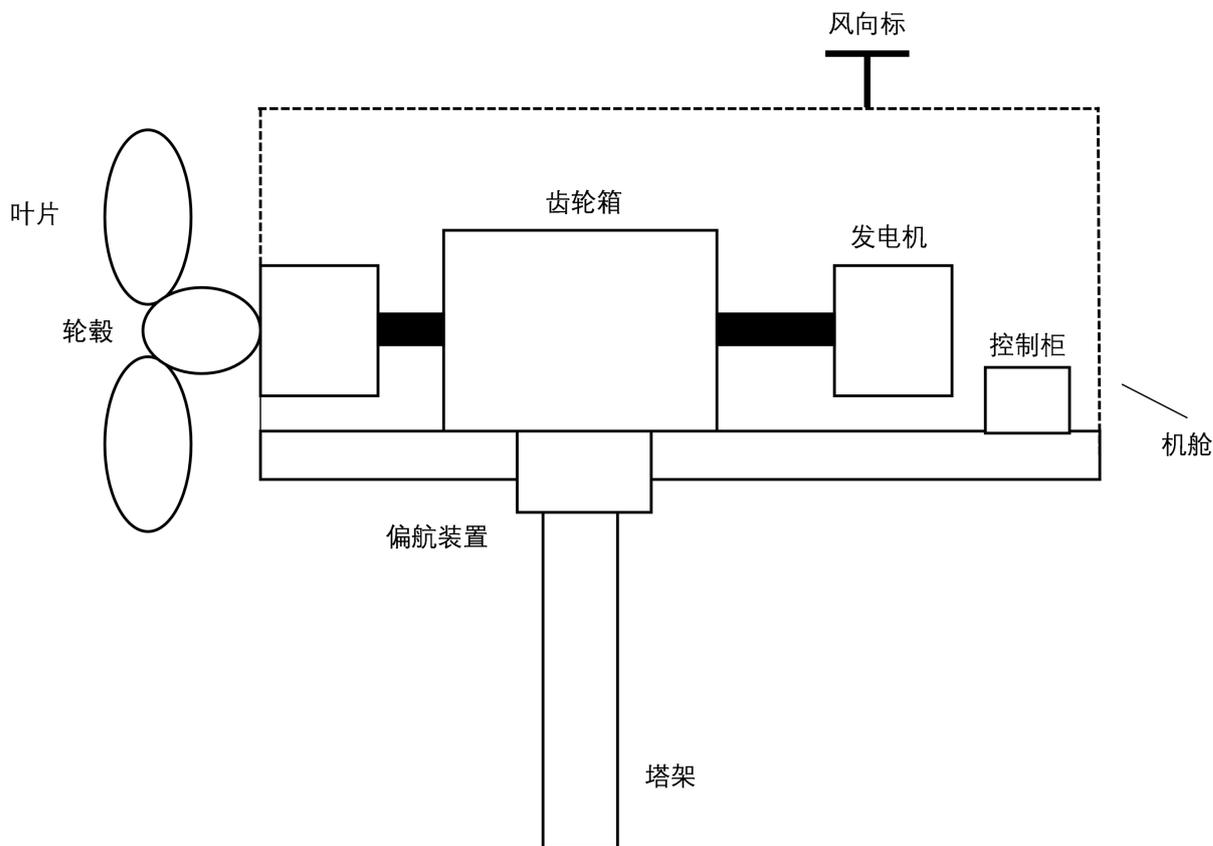


Figure 1. Structural diagram of horizontal axis wind turbine

图 1. 水平轴风力结构图

2.1.2. 风力机结构

由图 1 所示，风力机主要结构由风轮、机舱、和塔架组成。风轮：是风力机的重要构件，同时也是捕获风能的关键设备，捕获风能的大小直接决定了风轮的转速。叶片和轮毂是风轮的重要组成部分。

1) 叶片：是捕捉风能的最重要部件，叶片数目叶片材料的选择不同都会影响风机对风能的利用效率。小型风力机叶片常用优质木材整体加工而成，表面涂保护漆，或采用玻璃纤维等符合材料蒙皮；大中型风力机叶片常用纵向木条胶接，再以玻璃纤维作为壳体。

2) 轮毂：轮毂是风轮的枢纽，连接叶根与主轴，所有从叶片传来的力，均需通过轮毂传递，轮毂也是控制叶片桨距的所在，在设计中应当保证足够的强度，并力求结构简单。机舱：用来容纳风机的所有机械部件，承受外力作用。主要由传动系统(主轴、齿轮箱和高速箱)、发电机、控制系统、刹车系统、和调向系统(风向标、风速仪和偏航装置) [5]组成。

为了使风力机正常工作，必须有个最小的输入风速来达到扭动转矩的要求。现在市场上大多数风力发电机的启动速度为 2 至 3 m/s。刚进入叶片的风速被称为切入风速。当风速是在风力发电机的安全承受范围内时，切入风速越高，效果越好。当风速过高，超出了风力发电机的承受范围时，风机上的减速调节装置就会发挥作用，以使风力发电机能够安全运行。使风力机处于正常工作或额定功率下的风速分别是工作速度和额定风速。其中额定风速与风力发电机的性能联系最大，所以要以当地的风力资源作为参考，合理设置额定风速，对风力机性能和输出功率的提高有很大的作用[6]。

风力发电机发电功率的计算式：

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

式中, ρ —空气密度(kg/m^3);

R —风轮半径(m);

V —空气速度(m/s);

$C_p(\lambda, \beta)$ —风能利用系数;

λ —叶尖速比, 即风轮叶片尖端线速度与风速之比;

β —桨距角($^\circ$).

$C_p(\lambda, \beta)$ 的具体表达式:

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \beta - C_4 \right) e^{-\frac{C_5}{\lambda_i}} + C_6 \lambda \quad (2)$$

$$\lambda_i = \frac{1}{\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}} \quad (3)$$

系数 C_1 到 C_6 的取值依次为: 0.5176、116、0.4、5、21、0.0068 [7]。

由式(2)和(3)可算出对于任一桨距角 β , 存在唯一的风能利用系数最大值 C_{Pmax} , 对应一个最佳叶尖速比 λ_{opt} 对于任意的尖速比 λ , 桨距角 $\beta = 0^\circ$ 下的风能利用系数 C_p 相对最大。桨距角 β 增大, 风能利用系数 C_p 明显减小。

3. 风力机参数设置及模型搭建

根据厂家提供的风力机参数如下表 1 所示, 叶片材质为增强玻璃钢, 发电机类型为稀土永磁交流发电机。主要应用于通信行业、海岛、电力以及家庭用电领域。此次论文主要应用于家庭用电领域。

Table 1. FD7.0 wind turbine product parameters

表 1. FD7.0 风力机产品参数

参数	数值	单位
风轮直径	6	m
额定转速	105	rpm
额定风速	11	m/s
额定功率	10	KW
工作电压	220	V
启动风速	2.5	m/s
安全风速	50	m/s
塔架高	18	m
塔架类型	独立塔架	-

根据表 1 给出的风力发电机参数值, 通过式(1)在 MATLAB/SIMULINK 中建立风力机发电功率的计算模型, 如图 2 所示。其中, 风速是输入变量, 桨距角为 0° , 风力机发电功率是输出变量, 其流程如下图 3。

通过天气网查询到深圳地区 2021 年 11 月的气温和风速数据(见图 4、图 5), 我们得知该地区全年的气温变化在 $11^\circ\text{C} \sim 30^\circ\text{C}$ 之间。具体到 11 月份, 平均气温为 21.33°C , 而平均风速为 3.14 m/s 。这为我们评

估所选用发电机在实际条件下的运行提供了基础数据。

然而，11月份的风力情况似乎并不太乐观。从图5中可以观察到，大部分的风速数据点聚集在3 m/s左右，而5 m/s以上的数据点相对较少，超过9 m/s的数据点更是寥寥无几，仅有2个。这表明，深圳地区在11月份的风力较为弱势，而且较高风速的时段非常有限。

为了更准确地评估发电机在这一条件下的运行状况，我们将原本以一、二级等参数表示的风速转化为单位为 m/s 的数值，并选取每天的平均风速作为考察指标。这有助于更细致地了解系统在实际环境下的性能，为后续的发电机选择和系统优化提供更可靠的依据。

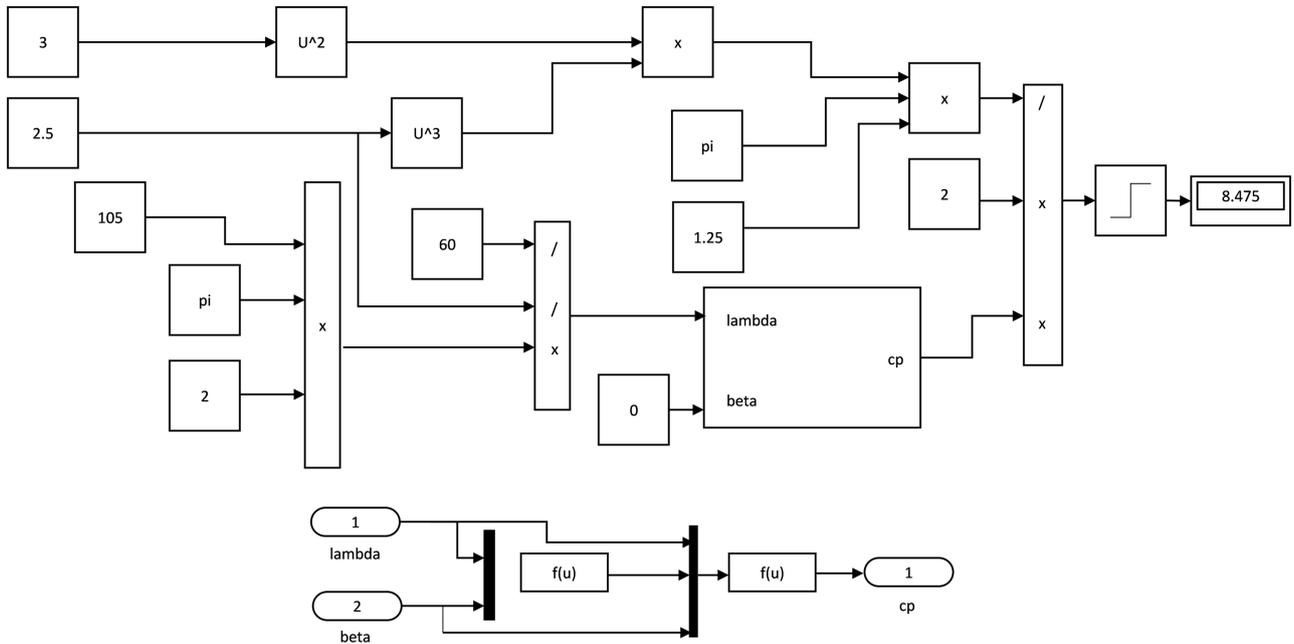


Figure 2. Wind power generation power model

图 2. 风力发电功率模型

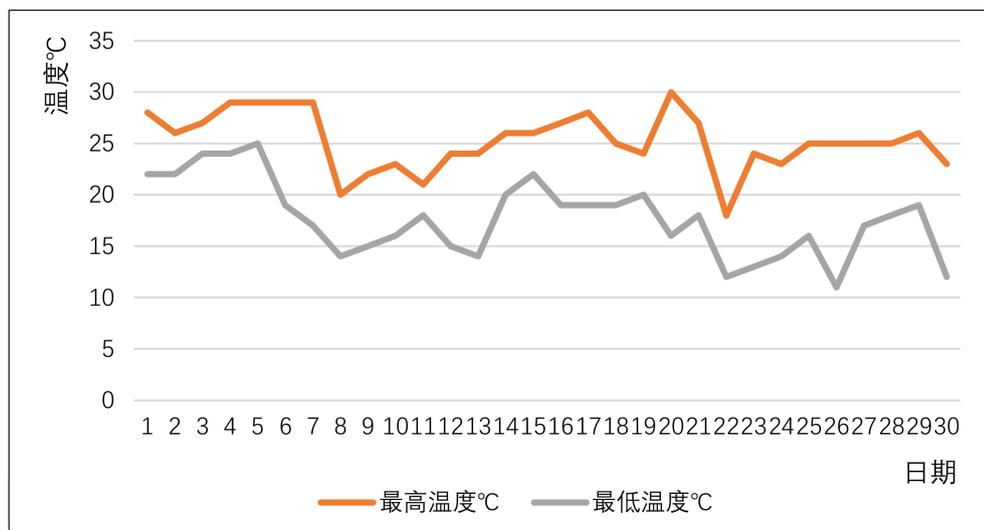


Figure 3. Meteorological Changes in Shenzhen in November

图 3. 深圳 11 月气象变化图

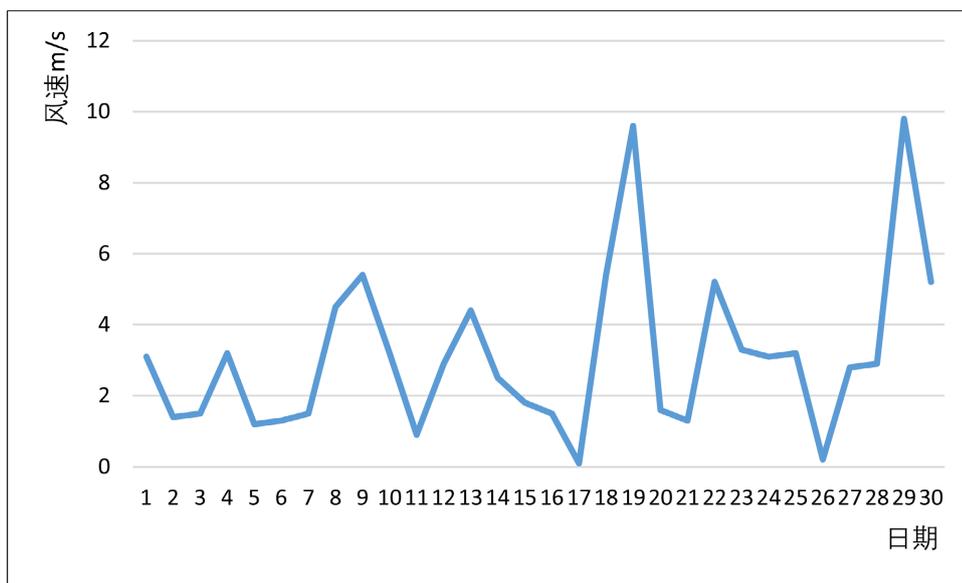


Figure 4. Wind speed variation chart for November in Shenzhen

图 4. 深圳 11 月风速变化图

将 12 月 20 日从 16:00 至 21 日 14:00 每隔一小时的风速进行统计，风速变化如图 5 所示。

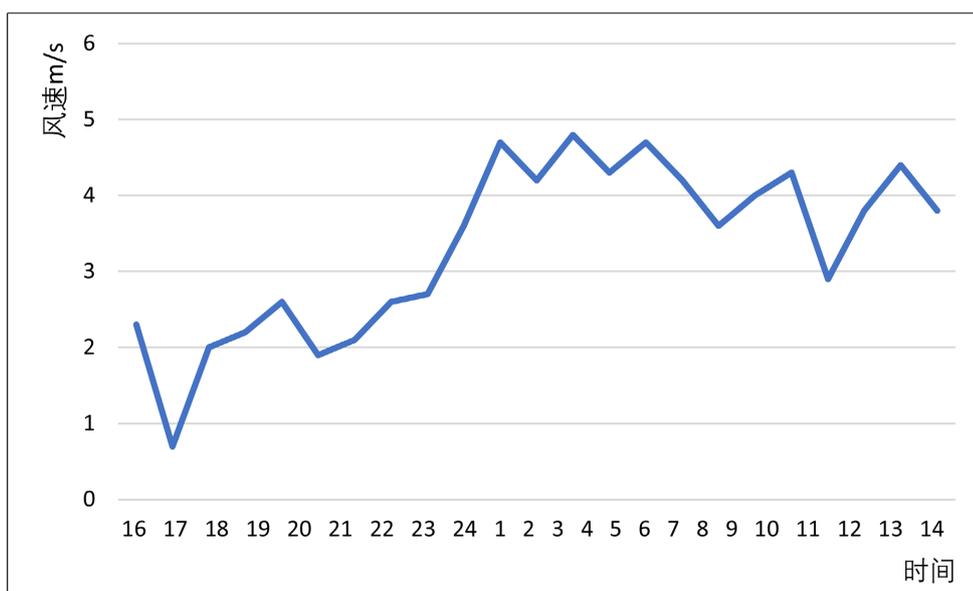


Figure 5. Wind speed variation chart in Shenzhen on December 21st

图 5. 12 月 21 日深圳风速变化图

4. 结果分析

通过图 5 的分析，我们可以明确 11 月份 60% 的时间内，深圳地区的风速维持在 2.5 m/s 以上，几乎一半的时间甚至超过了风力机的启动风速。这表明，在这段时间内，风力机有足够的风力来启动并正常运行，为电力供应提供了可靠的条件。特别值得注意的是，在这段时间内，风速的超出现象是连续的，进一步增强了系统的稳定性，减少了能源波动带来的不确定性。11 月风速与发电功率关系如图 6 所示。

对于未能启动的时间段，可采用智能储能策略，即在之前发电有余量的情况下进行储电。这意味着在风力机发电功率超过用电需求时，多余的电量可以被储存在储能系统中，以备后续在低风速或停风时使用。这种储能策略有助于平衡系统的能量供需，提高整个系统的可靠性和适应性。

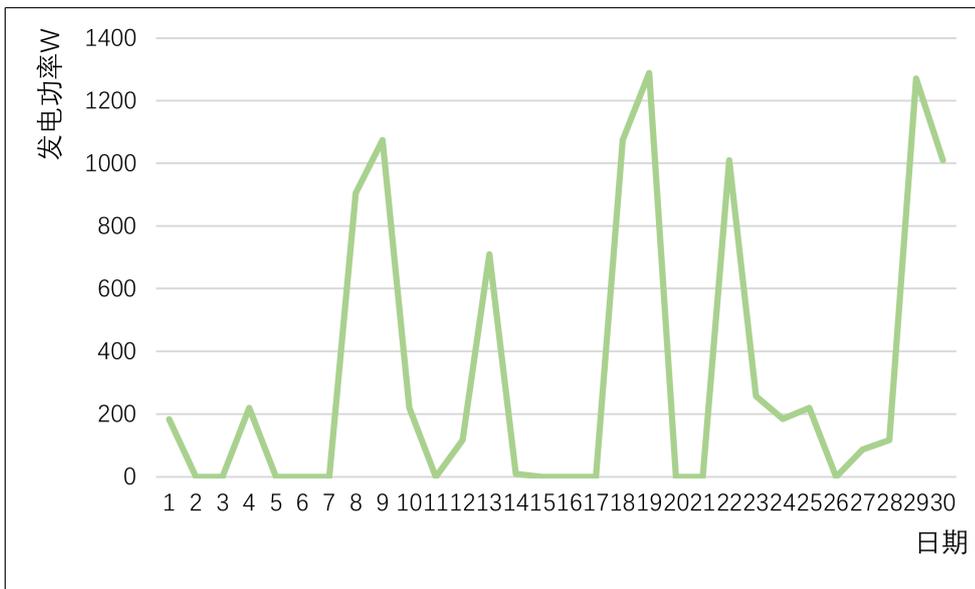


Figure 6. Relationship between wind speed and power generation in November
图 6. 11 月风速与发电功率关系图

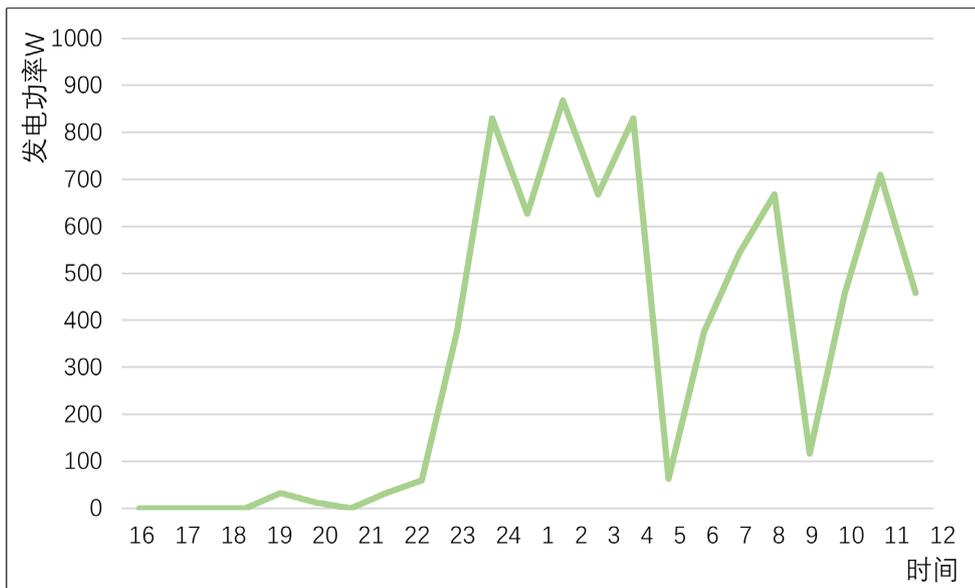


Figure 7. The relationship between wind speed and power generation on the 21st
图 7. 21 日风速与发电功率的关系

通过对图 7 的模拟结果的分析，我们了解到深圳 11 月份风力系统的最高发电功率为 1289 W。尽管风能的不稳定性导致发电功率存在较大波动，但通过输入每天的平均风速值，我们得到了风力发电系统的平均发电功率。尽管这不能完全反映实际瞬时功率的波动情况，但它揭示了在 11 月份该地区风力系统

的一般趋势。这有助于用户更全面地了解系统的性能，并为设计智能控制策略、储能系统的容量规划等提供参考。在未来的研究中，可以结合更多实际风速数据进行模拟，以进一步提高模型的准确性。

5. 结论

在选用 FD7.0 型号风力机的背景下，当风力状况不好的情况时，需要充分考虑深圳地区 11 月份风速仅使风力机工作时长达到 60% 的情况，虽然大部分时间能够达到风力机启动风速，平均风力系统的每日发电功率为 332 W，但这工作时长不足可能导致风力机无法满足大型用户的用电需求。为了解决这一挑战，建议引入风光互补发电系统，以最大化可再生能源的利用。通过结合风力和太阳能，可以弥补风力不稳定性带来的影响，提高系统的可靠性和稳定性。同时，考虑到风力和太阳能的波动性，建议引入储能系统，例如 11 月份风力系统的最高发电功率为 1289 W，在满足用电需求的前提下，将多余的电量储存起来，以应对低风速或夜间无风的情况，从而保障持续的电力供应。

尽管本文主要关注了 2021 年 11 月的风速条件，但为了更全面地评估风力机的性能，未来的研究可以考虑对整年的风速进行模拟。通过模拟不同季节和气候条件下的风速变化，可以更准确地预测系统在不同时间段内的发电性能。这样的分析将有助于为当地家庭用户提供更为准确和全面的选型参考，确保选用的风力机型号能够在整个年度内稳定且高效地发电。这种综合考虑和模拟分析将为未来选用合适功率的风力机提供必要的基础，以满足用户对可靠电力供应的需求。

参考文献

- [1] 喻莉, 茆美琴, 黄荣赓. 基于小型风力系统的单相电压型逆变器控制研究[J]. 电气自动化, 2010, 32(5): 44-47.
- [2] 中商情报网. 2021 年 1-11 月中国风电装机容量情况: 新增发电装机容量 2470 万千瓦[EB/OL]. <https://www.askci.com/news/chanye/20211220/1800081698157.shtml>, 2021-12-20.
- [3] Hatziargyriou, N. and Zervos, A. (2001) Wind Power Development in Europe. *Proceedings of the IEEE*, **89**, 1765-1782. <https://doi.org/10.1109/5.975906>
- [4] 任丽娜. 风速变化对风轮输出功率的影响及控制[D]: [硕士学位论文]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- [5] 宗豪华, 孙恩博. 水平轴风力机主动尾流控制综述[J]. 空气动力学学报, 2022, 40(4): 51-68.
- [6] 戴永庆. 溴化锂吸收式制冷空调技术实用手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [7] 李金玉. 风光互补发电制氢储能系统研究[D]: [硕士学位论文]. 天津: 天津商业大学, 2021.