

微型山坡地形对风电场性能的影响研究

杨号, 陈建*

上海理工大学, 能源与动力工程学院, 上海

收稿日期: 2023年7月26日; 录用日期: 2023年8月29日; 发布日期: 2023年9月5日

摘要

为探究微型山坡对风电场性能的影响, 本文以NREL 5MW水平轴风力机为研究对象, 对比分析了其在平原和微型山坡地形下串联风场的流动特性。同时探究微型山坡与下游风力机(HAWT2)相对距离(L)以及山坡坡度(θ)对风场功率输出的影响。结果表明, 山坡的迎风面能够将风电场底部高速气流引入上游风力机的尾流中, 有利于提高HAWT2的输出功率; HAWT2的输出功率随着 L 增加先减小后增大, L 为6D时HAWT2的输出功率增长最高, 比平原地形高70.3%, 总功率提高20.02%; θ 在 $30^\circ \sim 75^\circ$ 范围内, HAWT2的输出功率随着 θ 的增加先增大后减小, 当 $\theta = 60^\circ$ 时风电场总输出功率达到最高。

关键词

风场布置, 尾流恢复, 微型山坡, 数值模拟

Study of the Effect of Micro-Hillside Topography on Wind Farm Performance

Hao Yang, Jian Chen*

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

Received: Jul. 26th, 2023; accepted: Aug. 29th, 2023; published: Sep. 5th, 2023

Abstract

In order to investigate the effect of micro hillsides on wind farm performance, this paper compares the flow characteristics of tandem wind farms with NREL 5MW HAWT in plain and micro hillside terrain. The effects of the relative distance (L) between the micro hillside and the downstream wind turbine (HAWT2) and the slope of the hillside (θ) on the power output of the wind farm are also investigated. The results show that the windward side of the hillside can introduce

*通讯作者。

the high-speed airflow at the bottom of the wind farm into the wake of the upstream wind turbine, which is conducive to increasing the output power of HAWT2. The output power of HAWT2 first decreases and then increases as L increases, and the output power of HAWT2 is the largest when L is $6D$, which is 70.3% higher than that of the plain terrain, and the total power increases by 20.02%. When θ is in the range of $30^\circ\sim 75^\circ$, the output power of HAWT2 increases and then decreases as θ increases, and the total output power of the wind farm reaches the highest when $\theta = 60^\circ$.

Keywords

Layout of Wind Farm, Wake Recovery, Micro Hillside, Numerical Simulation

Copyright © 2023 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

随着我国经济的快速发展,对能源的需求不断增加。与此同时,化石燃料的使用带来的一系列环境污染问题也越来越受到人们的关注[1]。开发新能源以减少化石燃料的消耗已成为我国能源转型及高质量发展的重要任务。风能是重要的可再生能源,风电场的规模和数量正在快速增加,行业迅猛发展[2]。随着对风资源的开发利用以及土地资源日愈紧张,平原地区风资源可开发区域逐渐减少[3]。为了解决这一问题,人们的目光逐渐从平原转向了山区和丘陵地区。我国陆地山区幅员辽阔,面积占比大,与平原地区不同的是,山区和丘陵等地区的风资源分布更为丰富[4]。

近年来,大部分学者的研究主要集中于高度比[5](地形的垂直高度与风力机轮毂高度的比值)相对较大的山坡、悬崖和峡谷等地形对风力机的输出功率和流动特性的影响。Brogna 等人[6]建立了一种新型尾流模型,用于预测复杂地形的风力机尾流。预测结果与真实风电场现场测量数据较为吻合,证实了模型的有效性。Tian 等人[7]通过风洞实验研究不同坡度的山丘对风力机输出功率的影响。结果表明,地形和风力机安装在地形上位置的不同都会对风力机输出功率产生影响。与平坦地形相比,安装在山顶上的风力机由于加速效应,不仅能产生更多的电力,还会降低风力机的疲劳载荷。田琳琳等人[8]采用工程尾流模型模拟复杂风场的流动分布特征,并将模拟的结果与 FLUENT 的仿真计算结果进行对比。结果表明,优化后的复杂风场的风场布局相对于平原地形,总发电量能够提高 20%。庞博等人[9]利用 FLUENT 对布置在平原和狭管地形中的 2MW 风力机进行仿真模拟。结果表明,由于狭管地形对气流的加速作用,狭管地形的风力机输出功率要比平原地形高 5%~43.5%。

与大型山坡等地形不同,高度比相对较小的微地形对风电场作用的研究主要以防风林为主。Zhang 等人[10]将防风林简化为一块挡板,研究挡板与下游风力机的相对距离和倾斜度对风电场性能的影响。结果表明,合适的间距和倾斜度的挡风板,能将风电场总功率提高 6%。Tobin 等人[11]采用风洞试验研究了多孔防风林对风力机输出功率的影响。结果表明,防风林增加输出功率的同时还减少了风切变。Liu 等人[12]利用 LES 研究了防风林对大型风场功率输出影响。结果表明,防风林可增加大型风电场的发电量,防风林的最佳高度与风场的一些参数有关。

综上所述,地形是影响风电场输出功率关键参数之一,充分了解地形对风力机性能的影响规律对风场选址和风机布局至关重要。然而,目前研究大多集中于高度比较大的地形对风力机尾流和性能的影响,

而高度比较小的微地形下的研究对象主要以防风林为主。对于高度比小于 0.3 的微型山坡各项参数对风电场性能的影响研究鲜见报道。因此, 本文在均匀入流条件下, 在微型山坡两侧各放置一台 5MW 风力机, 研究微型山坡坡度和相对于风力机的距离对串列风电场输出功率和流动特性的影响。研究结果可为与本文相似地形的风电场布局和选址提供一些参考。

2. 控制方程与湍流模型

2.1. 控制方程

风电场数值模拟控制方程采用稳态 Navier-Stokes (RANS)方程, 其主要由质量守恒方程(1)和动量守恒方程组成(2):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u}_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \bar{u}_i \bar{u}_j)}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \tag{2}$$

式中: $i, j = 1, 2, 3$; 动力黏性系数 $\mu = 1.7894 \times 10^{-5} \text{ kg/(m}\cdot\text{s)}$; \bar{p} 为流场平均压力; $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ 为雷诺应力项。

2.2. 湍流模型

SST $k-\omega$ 结合了 $k-\omega$ 模型和 $k-\varepsilon$ 模型的优点, 其具有较好的风力机气动预测和流场特性捕捉的能力[13]。因此, 此本文选择 SST $k-\omega$ 湍流模型来进行数值模拟, 模型的控制方程由方程(3)和(4)组成:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \tag{3}$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \omega \bar{u}_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega - Y_\omega + D_\omega + S_\omega \tag{4}$$

式中: k, ω 为湍动能和湍流耗散率, Γ, G, Y 分别为湍流的扩散系数, 产生项和耗散项, D_ω 为正交发散项, S 为自定义源项。

3. 数值方法

3.1. 风力机几何模型

本文所采用的风力机模型为美国可再生能源实验室(NREL)开发的 5MW 风力机[14], 为三叶片, 上风向的海上水平轴风力机, 其主要参数如表 1 所示。

Table 1. Main parameters of NREL 5MW wind turbine
表 1. NREL 5MW 风力机主要参数

参数	数值
额定功率/MW	5
叶片数/个	3
轮毂高度/m	90

Continued

风轮直径/m	126
额定转速/ $r \cdot \text{min}^{-1}$	12.1
额定风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	11.4
切入风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	3
切出风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	25

3.2. 串联风场几何模型

风场布置如图 1 所示。图 1(a)是平原地形下风力机串联布置, 作为本文的参考风场。上游风力机命名为 HAWT1, 下游风力机命名为 HAWT2。由于上游风力机的尾流效应会导致下游风力机的输出功率大幅度下降。因此, 本文以风轮直径 D 为基准, 风力机组之间的安装距离采用标准距离 $7D$ [15]。HAWT1 与入口边界的距离为 $2D$, HAWT2 与出口边界为 $6D$ 。整个风电场尺寸为 $4D \times 2.72D \times 15D$ 。图 1(b)是具有微型山坡的串联布置, 其中 H 为山坡的高度, θ 为坡度, L 为山坡与下游风力机之间的距离。整个山坡横穿整个计算域, 长度为 $4D$, 山坡顶点高度与风力机的叶轮最低点重合, $H = 27 \text{ m}$ 。

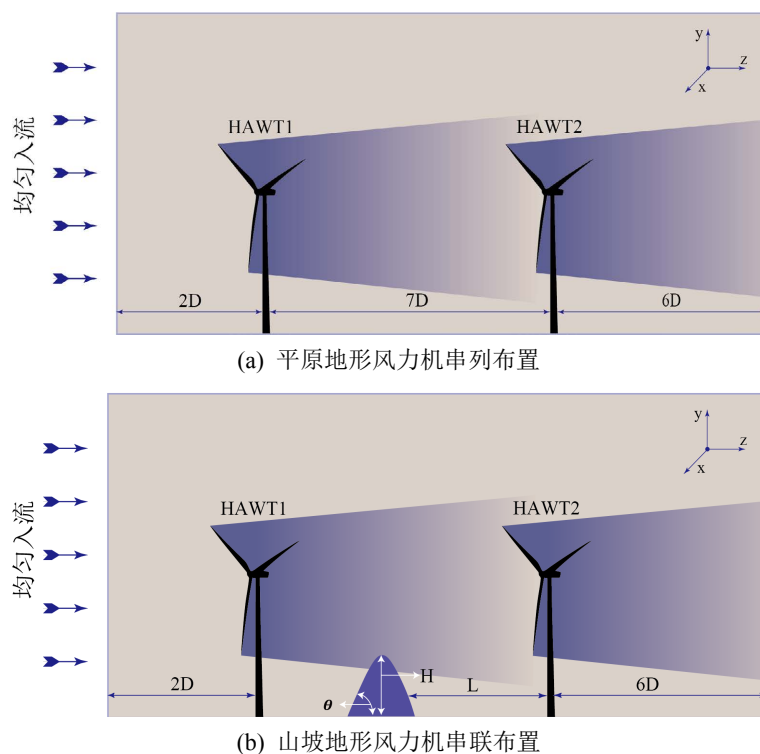


Figure 1. Schematic diagram of the wind farm
图 1. 风场示意图

3.3. 网格划分及边界条件设置

本文采用 ANSYS Meshing 对计算域进行网格划分。计算域网格的分布和大小在准确预测转子性能和流场方面发挥着重要作用。如图 2 所示, 风电场的计算域分为两部分。分别为包含 HAWT 转子的旋转域,

以及静止域。静止域的网格尺寸为 $0.159D$ ，旋转域网格尺寸为 $0.027D$ ，增长率为 1.15。为更好的捕捉尾流发展和演变过程，对靠近风力机尾流区域和山坡进行了网格局部加密。该区域的网格尺寸为 $0.04D$ 。如图 3 所示，为了准确捕捉叶片的几何结构，使得模拟结果更加准确。本文还对 HAWT 的叶片和尾缘区域分别进行了网格加密，叶片表面网格尺寸为 $0.0024D$ ，尾缘网格尺寸 $0.00024D$ ，并在叶片表面覆盖了 20 层棱柱层网格。

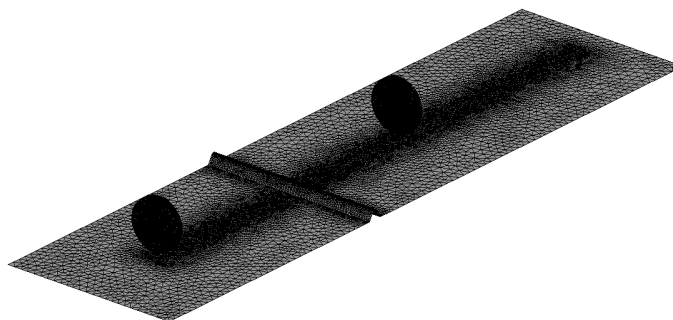


Figure 2. Computational domain grid
图 2. 计算域网格

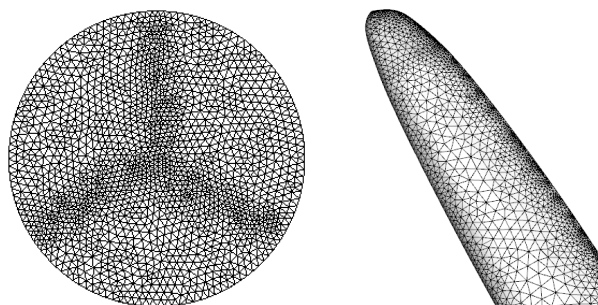


Figure 3. Rotation field and blade grid
图 3. 旋转域及叶片网格

如图 4 所示，速度入口风速采用均匀的入流风速。考虑到地形影响，壁面边界条件需要发生改变，山坡和地面设为壁面无滑移边界。风电场的两侧和顶部设置为对称边界。应用界面边界条件在旋转域和静止域之间交换数据。入口边界设为速度入口，出口设为压力出口，其中速度入口的风速采用 HAWT 的额定风速 $11.4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

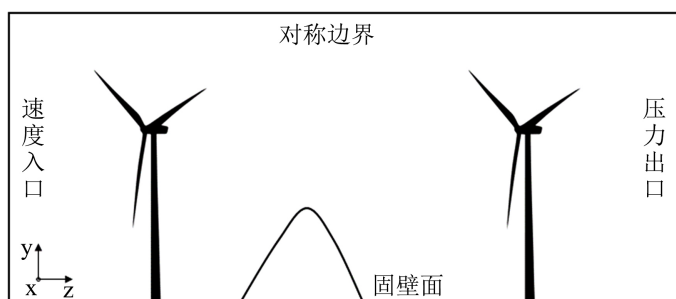


Figure 4. Calculation domain boundary condition
图 4. 计算域边界条件

3.4. 功率及网格无关性验证

风力机的气动功率输出可以通过以下公式计算[16]:

$$P = M \frac{n \cdot 2\pi}{60} \quad (5)$$

其中, P 是风力涡轮机的功率输出, W; M 是风力机叶片的扭矩, N·m; n 是风力机的转速, r/min。

$$\gamma = \frac{|P - P_0|}{P_0} \times 100\% \quad (6)$$

其中是 γ 相对误差, P_0 为 5MW 风力机的额定功率。

为验证网格数量是否会影响风力机的输出功率, 我们采用三种网格数量进行无关系验证。获得了不同网格下 5MW HAWT 的扭矩, 根据公式(5)得到风力机输出功率, 如表 2 所示。HAWT 网格数量由低到高分别为 504 万、765 万和 838 万, 所对应的相对误差分别为 4.36%、3.06%和 3.22%。考虑到计算资源以及计算精度, HAWT 的网格数量确定为 765 万, 得到总的风电场数量约为 1755 万, 网格数量与文献[10]大致相同。

Table 2. Output power and γ under different grid numbers of HAWT

表 2. HAWT 不同网格数量下输出功率及 γ

风力机	旋转域网格(万)	静止域网格(万)	输出功率(kW)	γ (%)
5MW HAWT	838	323	4839	3.22
	765	225	4847	3.06
	504	172	4782	4.36

4. 计算结果与分析

4.1. 平原和微型山坡地形流动特性对比分析

图 5 为平原地形和山坡地形风电场速度分布云图。平原地形时, HAWT1 提取来流风速的风能后, 在其后形成了一条尾流低速区。即使采用 7D 的标准距离, HAWT1 尾流仍未完全恢复。但在微型山坡地形的作用下, HAWT1 的尾流速度亏损得到很好的改善。同时, 由于山坡的存在, HAWT2 后的低速区域蓝色面积(红色椭圆虚线)相比平原地形明显减少。同时, HAWT2 上游(黑色长方形)出现了一块高速气流区域。这是由于山坡将底部高速气流引导到 HAWT1 的尾流中, 弥补其尾流的速度亏损, 这也导致山坡背风面出现了很大一块低速区域。

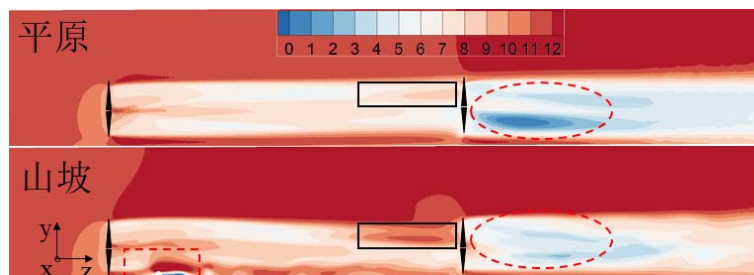


Figure 5. Wind farm velocity clouds for plain terrain and hillside terrain

图 5. 平原地形与山坡地形的风场速度云图

4.2. 微型山坡相对距离对风电场的影响分析

4.2.1. 相对距离对风电场输出功率的影响

为了探究山坡与下游风力机之间的 L 对风电场输出功率的影响。本文以 HAWT2、 $H = 27\text{ m}$ 和 $\theta = 60^\circ$ 为基准, 研究了 L 在 $1D \sim 6D$ 时, 其对 HAWT2 输出功率的影响。如图 6 所示。总体而言, 相比于平原地形, 山坡的存在是有利于提高 HAWT2 的输出功率。但是山坡也会对 HAWT1 的输出功率有着一些不利影响。这些不利影响会随着 L 的增加而增加。这是因为随着 L 的增加, 导致山坡与 HAWT1 的距离减小; 当 $L = 1D$ 时, HAWT1 的输出功率为 4832 kW , 如图所示, 随着 L 的增加 HAWT1 的输出功率逐渐减小。当 $L = 6D$ 时, HAWT1 的输出功率为 4760 kW , 相比于 $1D$ 时, 下降了 1.49% ; 如图所示, HAWT2 的输出功率随着 L 的增加先减小后增大。当 $L = 3D$ 时, HAWT2 的输出功率为 2532 kW , 比平原地形提高了 22.43% , 总输出功率提高 6.48% 。当 $L = 6D$ 时, HAWT2 的输出功率为 3522 kW , 增加了 70.3% , 总输出功率提高了 20.02% 。

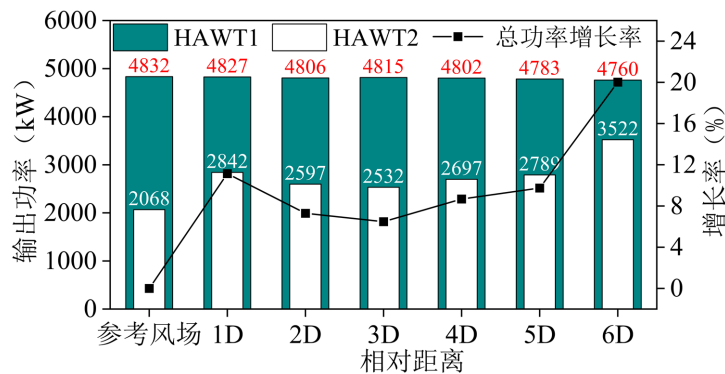


Figure 6. Wind turbine output at different L
图 6. 不同 L 下的风力机输出功率

4.2.2. 不同 L 时风电场的流动特性

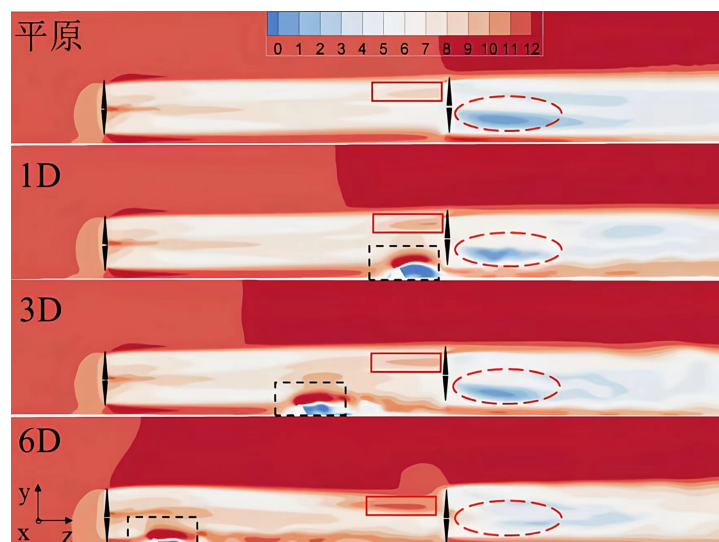


Figure 7. Wind farm velocity clouds at different L
图 7. 不同 L 下的风力机速度分布云图

图7是不同相对距离 L 下的风力机速度分布云图。如图所示,风电场顶部的高速气流区域随着 L 的增加,不断向HAWT1方向移动。 $L=6D$ 时,HAWT1前的低速区域(橘黄色部分)相比于 $1D$ 和 $3D$ 时明显扩大。由于山坡的阻挡,底部的高速流被引导进HAWT1的尾流中。但同时也会将HAWT1尾流中的一部分低速流体阻碍,导致其往HAWT1方向流动并与来流风速混合。随着 L 的增加,这种影响会逐渐加剧,从而导致HAWT1功率下降;如图所示,相比于平原地形,HAWT2的尾流低速区域面积(红色虚线椭圆)随着 L 的增加,先增大后减小。HAWT2入口风速(红色正方形)先减小后增大;当 $L=1D$ 时,被山坡引导的这部分高速气流(黑色长方形)与HAWT1的尾流混合后,由于距离太短,到达HAWT2的入口处时,混合并不充分。当 $L=3D$ 时,山坡背风面的低速区域的风速会与HAWT1的尾流不断混合,背风区域后面底部的能量不断恢复,从而导致到达HAWT2前面的风速有所降低。当 $L=6D$ 时,这部分高速气流与HAWT1的尾流有较长的距离和时间进行混合,提高了HAWT2的入口风速,输出功率达到最高。

4.3. 微型山坡坡度对风电场的影响分析

4.3.1. 坡度对风电场输出功率的影响

为研究山坡坡度对下游风力机输出功率的影响,以最佳相对距离 $L=6D$ 为基准,研究坡度 θ 为 30° 、 45° 、 60° 和 75° 时HAWT2的输出功率变化。如图8所示, θ 在 $30^\circ\sim 60^\circ$ 范围内变化时,下游风力机输出功率随着 θ 的增加而增加;当 $\theta=30^\circ$ 时,HAWT2的输出功率为2901 kW,相比于平原地形提高了40.28%;当 $\theta=60^\circ$ 时,HAWT2的输出功率为3522 kW,相比于平原地形,总输出功率提高了20.02%;如图所示, $45^\circ\sim 60^\circ$,HAWT2输出功率相比于 θ 在 $30^\circ\sim 45^\circ$ 时提升更加明显。然而, θ 并不是越大越好,当坡度超过 60° 后,HAWT2的输出功率不增反降;当 $\theta=75^\circ$ 时,HAWT2的输出功率为3129 kW。相比于 $\theta=60^\circ$ 时,HAWT2的输出功率下降了11.16%。

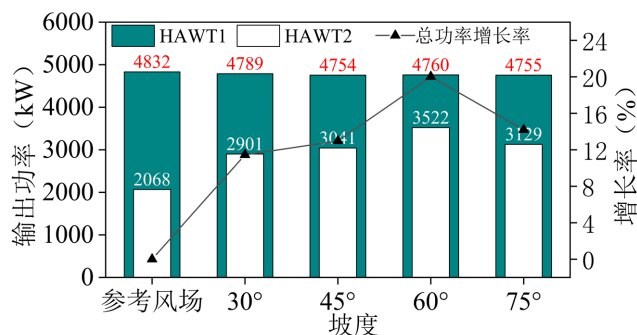


Figure 8. Wind turbine output at different θ

图8. 不同 θ 下的风力机的输出功率

4.3.2. 不同 θ 时风电场的流动特性

图9为不同坡度 θ 下的风场的速度云图,从图中可以清楚的看见 θ 在 $30^\circ\sim 75^\circ$ 时风电场风速变化情况。如图9所示,相比于参考风场,HAWT2尾流区域(红色虚线椭圆)的尾流亏损随着坡度 θ 的增加而明显改善。但 $\theta=75^\circ$ 时,HAWT2的尾流亏损相比于 60° 时加剧;从图中的山坡附近的区域(黑色虚线框)也可以明显看出,山坡迎风面对风电场底部区域的气流具有加速和导流的作用。随着 θ 的增加,这种加速作用更加明显,山坡坡顶的加速区域面积也随之增加。当 $\theta=75^\circ$ 时,坡顶的加速区域面积相比于 60° 时明显减小;如图9所示, θ 在 $30^\circ\sim 75^\circ$ 时,HAWT2前的高速气流区域面积(红色长方形)都相比于平原时明显增加。 θ 在 $30^\circ\sim 60^\circ$ 时高速区域面积逐渐增大, θ 为 75° 时该区域面积相比于 60° 时明显减少;因此,风电场的输出功率随着山坡坡度 θ 的增加,先增加后减小。 $\theta=60^\circ$ 时,整个风电场的输出功率达到最大。

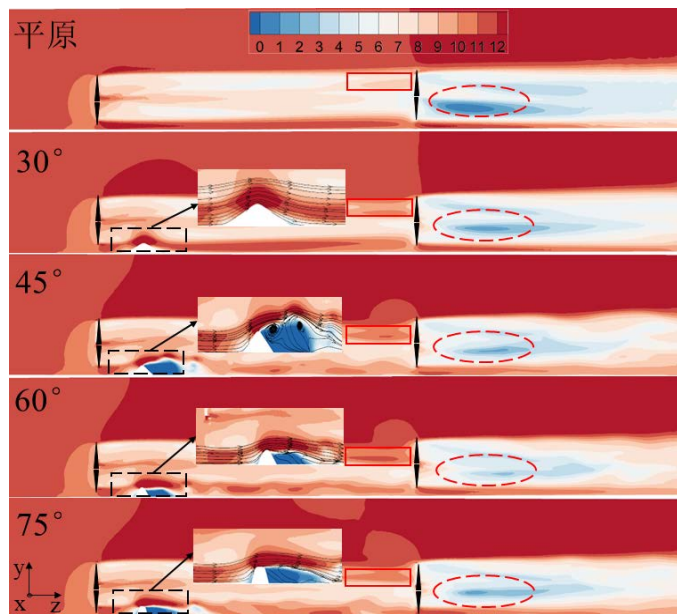


Figure 9. Wind farm velocity clouds at different θ
图 9. 不同 θ 下的风场速度云图

5. 结论

1) 山坡的存在能够将风电场底部未利用的高速气流引导到上游风力机的尾流中, 有利于提高整个风电场的功率输出。

2) 以下游风力机为基准, 研究了山坡不同 L 对 HAWT2 输出功率的影响。结果表明, 随着 L 的增加, HAWT1 的输出功率逐渐增加, HAWT2 的输出功率先减小后增加; 当 $L = 3D$ 时, HAWT2 的输出功率最小, 与平原地形相比提高了 22.43%; 当 $L = 6D$ 时, HAWT2 输出功率达到最大, 与平原地形相比提高了约 70.3%, 总功率提高了约 20.02%。

3) 以最佳输出功率的位置 $L = 6D$ 为基准, 研究了山坡不同 θ 对 HAWT2 输出功率的影响。结果表明, 随着 θ 的增加, HAWT2 的输出功率先增加后减小; 当 $\theta = 60^\circ$ 时, HAWT2 的输出功率达到最大。

参考文献

- [1] 王渊博, 李春, 缪维跑, 等. 水平轴风力机组风场全局优化策略研究[J]. 热能动力工程, 2017, 32(6): 100-106.
- [2] Raheem, A., Hassan, M.Y., Shakoor, R. and Rasheed, N. (2014) Economic Feasibility of Stand-Alone Wind Energy Hybrid with Bioenergy from Anaerobic Digestion for Electrification of Remote Area of Pakistan. *International Journal of Integrated Engineering*, **6**, 1-7.
- [3] 左薇, 李惠民, 芮晓明, 等. 风电场山坡地形的数值模拟研究[J]. 太阳能学报, 2019, 40(5): 1441-1447.
- [4] 黄超. 山坡地形对风力机功率特性的影响研究[D]: [硕士学位论文]. 湛江: 广东海洋大学, 2022.
- [5] Kozmar, H., Allori, D., Bartoli, G. and Borri, C. (2016) Complex Terrain Effects on Wake Characteristics of a Parked Wind Turbine. *Engineering Structures*, **110**, 363-374. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.11.033>
- [6] Brogna, R., Feng, J., Sørensen, J.N., et al. (2020) A New Wake Model and Comparison of Eight Algorithms for Layout Optimization of Wind Farms in Complex Terrain. *Applied Energy*, **259**, Article ID: 114189. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114189>
- [7] Tian, W., Ozbay, A. and Hu, H. (2018) An Experimental Investigation on the Aeromechanics and Wake Interferences of Wind Turbines Sited over Complex Terrain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **172**, 379-394. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.11.018>
- [8] 田琳琳, 赵宁, 武从海, 等. 复杂地形风电场的机组布局优化[J]. 南京航空航天大学学报, 2013, 45(4): 503-509.

-
- [9] 庞博, 邓胜祥. 山地典型地形下的 2MW 风力机仿真研究[J]. 太阳能, 2016(8): 56-61.
- [10] Chen, J., Zhang, Y., Xu, Z.Y. and Li, C. (2023) Flow Characteristics Analysis and Power Comparison for Two Novel Types of Vertically Staggered Wind Farms. *Energy*, **263**, Article ID: 126141. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.126141>
- [11] Tobin, N., Hamed, A.M. and Chamorro, L.P. (2017) Fractional Flow Speed-Up from Porous Windbreaks for Enhanced Wind-Turbine Power. *Boundary-Layer Meteorology*, **163**, 253-271. <https://doi.org/10.1007/s10546-016-0228-8>
- [12] Liu, L. and Stevens, R.J. (2021) Enhanced Wind-Farm Performance Using Windbreaks. *Physical Review Fluids*, **6**, Article ID: 074611. <https://doi.org/10.1103/PhysRevFluids.6.074611>
- [13] 张浩. L 小翼对 5MW 水平轴风力机气动性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州理工大学, 2019.
- [14] Jonkman, J., Butterfield, S., Musial, W. and Scott, G. (2009) Definition of a 5-MW Reference Wind Turbine for Off-shore System Development. National Renewable Energy Lab. (NREL), Golden, CO (United States). <https://doi.org/10.2172/947422>
- [15] Choi, N.J., Nam, S.H., Jeong, J.H. and Kim, K.C. (2013) Numerical Study on the Horizontal Axis Turbines Arrangement in a Wind Farm: Effect of Separation Distance on the Turbine Aerodynamic Power Output. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, **117**, 11-17. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2013.04.005>
- [16] 姜洪志, 张宇, 陈建, 等. 风力机垂直交错对下游风力机性能的影响研究[J]. 热能动力工程, 2022, 37(5): 107-114.