

实际风况下萨沃纽斯风力机集群 性能及布局规律研究

齐文闯, 陈云瑞, 郭朋华, 邹瀚森, 李景银

(西安交通大学能源与动力工程学院, 710049, 西安)

摘要: 为探究风况条件对萨沃纽斯风力机集群功率输出和安装方向的影响, 基于变转速控制策略和计算流体力学仿真结果, 获得了集群在我国8个典型站点不同安装方向下的输出功率, 分析了集群在实际风况下的最佳布局规律, 并验证了规律的普适性。仿真结果表明: 在沈阳、厦门、昆明、呼和浩特、青岛、喀什、大连以及郑州8个站点合理安装集群, 可使单台机组的输出功率分别提升至原来的1.14、1.23、1.31、1.20、1.21、1.24、1.12、1.11倍; 对于有明显单一主风能风向的地区, 集群应正对此方向摆放; 对于两个主风能风向相位差较大的地区, 需选择两者中周围风能更丰富的方向排布集群; 对于有3个主风能风向、主风能风向不明显或风能分布比较均匀的地区, 应先使机组相互格挡的方位避开风能相对集中区, 再选择风能资源较丰富的方向排布集群。该研究可使实际风况下萨沃纽斯风力机集群耦合增益最大化, 并为复杂风场条件下集群安装方向的选择提供参考。

关键词: 变转速控制; 萨沃纽斯风力机集群; 耦合增益; 安装方向

中图分类号: TK83 **文献标志码:** A

DOI: 10.7652/xjtub202404008 **文章编号:** 0253-987X(2024)04-0085-11

Study on the Performance and Layout Rules of the Savonius Wind Turbine Cluster Under Actual Wind Conditions

QI Wenchuang, CHEN Yunrui, GUO Penghua, ZOU Hansen, LI Jingyin

(School of Energy and Power Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: To explore the effect of wind conditions on the power output and installation direction of the Savonius wind turbine cluster, the power output of the proposed cluster under different installation directions at eight typical sites in China was obtained based on the variable speed control strategy and computational fluid dynamics simulation results. The optimal layout rules of the cluster under actual wind conditions were analyzed, and their universality was verified. The simulation results show that the output power can be increased to 1.14, 1.23, 1.31, 1.20, 1.21, 1.24, 1.12 and 1.11 times by properly installing cluster in Shenyang, Xiamen, Kunming, Hohhot, Qingdao, Kashgar, Dalian and Zhengzhou. For regions with an apparent single main wind energy direction, the cluster should be placed facing that direction. For regions with a significant phase difference between two main wind energy directions, the cluster should be arranged in the direction with more abundant wind energy resources. For regions with three main wind energy directions, no obvious main wind energy direction, or relatively uniform wind energy

distribution, the cluster should be arranged in a direction avoiding the area where the wind turbines block each other, and then the direction with more abundant wind energy resources should be selected. This study maximizes the coupling gain of the Savonius wind turbine cluster under actual wind conditions and provides references for the selection of cluster installation directions under complex wind farm conditions.

Keywords: variable speed control; Savonius wind turbine cluster; coupling gain effect; installation direction

为了应对气候变化以及化石能源枯竭的难题,世界各国在保证自身能源供应的前提下大力发展新能源,我国更是提出了“碳中和、碳达峰”的宏伟目标。在众多新能源中,风能以储量大、前景广阔等优势受到众多国家的广泛关注并得到大力发展^[1]。近年来,随着我国风电行业的蓬勃发展,陆上风能资源丰富地区的风电场建设趋于饱和,基于分布式的低风速风能开发利用成为了研究热点^[2]。风电机组是将风能转化为电能的常用设备,根据主轴方向可分为水平轴和垂直轴两大类^[3]。水平轴风电机组因单机容量大、风能利用率高等特点而得到广泛应用,但其尾流区风速恢复较慢,且对于风向频变地区的适应性欠佳,因此不适用于城市中、低风速风能的分布式发电^[4]。相比之下,垂直轴萨沃纽斯风力机因启动风速低、气动噪声小、排列更紧凑以及无需对风等优点^[5-7],作为分布式微型离网发电机组在城市中的应用则具有巨大的潜力。

由于垂直轴萨沃纽斯风力机的风能利用系数较低,因此提高萨沃纽斯风力机的风能利用率一直是热点研究内容。对萨沃纽斯风力机性能改进的研究大致可分为以下4类^[8]: ①改进机组构型^[9-11]。王军等^[9]通过改变叶片数目和叶片弯曲程度来提高萨沃纽斯风力机的风能利用率,提出了一种六叶片转子加定子的新型结构,其最大风能利用率可达40%。②增加导流板等附加装置^[12-16]。Salleh等^[14]实验探究了导流板对萨沃纽斯风力机自启动特性和动力特性的影响,发现导流板可以使风力机性能提高84.6%。③与H型风力机组合使用^[8]。④利用多台机组的集群增强效应^[17-20]。Zheng等^[18]构建了一个由3台萨沃纽斯风力机组成的集群,通过优化发现可使集群平均功率系数提高36.8%。Zhang等^[20]从候鸟的两种飞行队形(V形、I形)中获得启发开发了双机组集群,可使平均功率系数提高22.9%,并基于此集群模块开发了一个V字形多机阵列风电场。

随着萨沃纽斯风力机构型的逐渐成熟,通过集群效应提高机组风能利用率的方法得到了越来越广

泛的关注,高效模块化的集群结构也为高密度化的风电场微观选址提供了基础。然而,目前集群的研究大多仅针对单一风向下集群的增益情况展开探讨,没有考虑其他风向下集群的功率输出情况。同时,集群排布方式一定程度上破坏了垂直轴风力机独有的“万向性”特点,即当来流风向变化时,集群中机组相对紧凑的位置关系使得下游机组处于上游机组的尾流中,导致其功率输出受风向影响显著,从而影响集群的平均功率输出。水平轴机组通过偏航灵活对风可以较好地应对风向改变的问题,而萨沃纽斯风力机一般不具有偏航驱动,即集群中机组的相对位置自建成后很难改变,因此,研究集群在不同风况条件下的功率输出很有必要。Mereu等^[21]研究了15°、30°及45°风向角下8台萨沃纽斯风力机集群的性能,发现随着风向角的变大,集群效率逐渐下降,在45°来流风向下机组的平均效率降低了19%左右,其原因同Golecha等^[22]的研究相类似,即由于上游机组的格挡作用导致下游机组效率偏低,最终研究表明线性阵列正对主风向摆放时增益效果最佳。Belabes等^[23]通过研究发现,直线串列萨沃纽斯风力机集群在50°~20°风向范围内可获得较高的功率输出。在真实风场中,360°风向上均有风能分布,然而,上述研究中的风向改变范围较小,没有分析360°全风向下集群的输出功率情况,也没有系统总结针对真实风场不同风况条件下萨沃纽斯风力机集群的最佳安装风向规律,对现实风场布局的指导意义具有一定局限性。同时,下游机组受上游机组的影响,导致其感知到的风速与来流风速不同,最佳转速也应不同,但目前的研究中常常忽略这一影响,而是简单地设定各机组采用定转速运行。因此,为了使数值模拟更贴近真实情况,需要一种变速控制方法使得集群中各机组均处于最佳功率点运行,从而更全面地评估集群在全风向下的整体性能。

本文通过编译Fluent软件中用户自定义函数(UDF)来实现集群中各机组的变转速控制,基于不同风况条件下计算流体力学(CFD)数值模拟结果,

评估了萨沃纽斯风力机集群在 4 个地区 8 个典型站点不同安装方向下的功率输出增益情况,总结了不同风况条件下的集群最佳安装方向规律,并证明了该规律对三角形萨沃纽斯风力机集群在真实风场中安装方向的选择具有一定普适性。

1 计算模型及变转速控制策略

1.1 几何模型及计算域

图 1 为目前广泛使用的双叶片萨沃纽斯风力机组构型,其中叶轮直径 D 为 0.95 m,高为 1.00 m,叶片由两个直径 d 为 0.50 m 的半圆形板构成,运动方向与来流方向相同的叶片为前进叶片,相反的为回转叶片。叶片厚度 t 为 1 mm,两叶片的重叠距离 e 为 50 mm,重叠比 s 为 0.1。

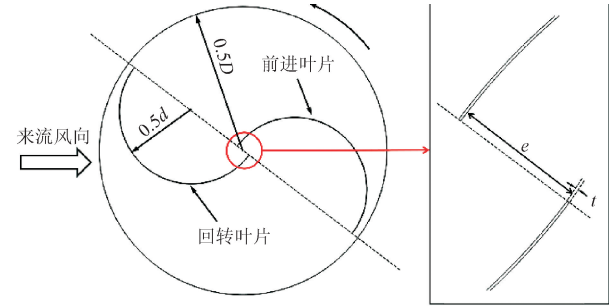


图 1 双叶片萨沃纽斯机组构型

Fig. 1 Configuration of double-vane Savonius wind turbine

如图 2 所示,计算域包含 3 个静止域和 3 台机组的旋转域,其中,3 个旋转域的相对位置随集群构型的改变而改变。为避免边界条件对仿真结果的影响,进口边界距离旋转域 $15D$,出口边界距离旋转域 $30D$,模拟采用速度进口、静压出口。湍流模型采用 $k-\omega$ SST 模型,压力速度采用耦合求解算法,压力插值修正采用二阶插值方案。

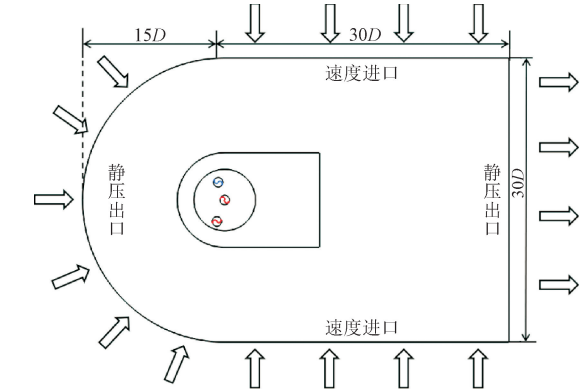


图 2 萨沃纽斯风力机集群数值求解计算域

Fig. 2 Computational domains of the Savonius wind turbine cluster

机组的性能用机组功率系数(风能利用率) C_P 来评估,集群的增益效果用功率比 F 来评估。机组功率 P 、功率系数 C_P 、功率比 F 的表达式分别为

$$P = T\omega \tag{1}$$

$$C_P = \frac{2T\omega}{\rho U_{in}^3 A} \tag{2}$$

$$F = \frac{P_c}{P_i} \tag{3}$$

式中: T 为机组扭矩; ω 为机组转速; ρ 为空气密度,取值为 1.29 kg/m^3 ; U_{in} 为来流风速; A 为机组横截面积; P_c 为机组集群的平均输出功率; P_i 为孤立机组的输出功率。

机组转速与来流风速的关系用无量纲参数叶尖速比 λ 表示,可写为

$$\lambda = \frac{\omega D}{2U_{in}} \tag{4}$$

1.2 网格及计算方法

二维模型采用三角形非结构化网格划分,对网格由外到内进行加密处理,叶片表面设置为边界层,边界层 y^+ 小于 1.5,如图 3 所示。旋转域与静止域之间设置交界面,用滑移网格方法进行计算,选取 $k-\omega$ SST 湍流模型,进口速度设置为来流风速,出口静压设置为 0。

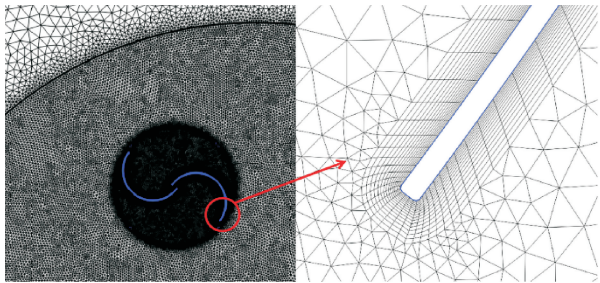


图 3 计算域及边界层网格示意图

Fig. 3 Grid diagram of the computational domain and boundary layer

以机组的功率系数 C_P 作为参考指标,选择 5 种网格方案对孤立机组进行网格无关性验证,结果如表 1 所示。由表 1 可见,随着网格数增多, C_P 逐渐趋于稳定,方案 3 与方案 5 的 C_P 相差 0.87%,故机组旋转域可选择网格数较少的方案 3,此时计算域网格总数接近 400 000。采用此网格数进行时间步长无关性验证,结果表明,时间步长为 0.001 s 时的 C_P 与 0.000 5 s 时的误差仅为 0.9%,考虑到计算成本,故选取 0.001 s 作为时间步长进行计算。

表 1 网格无关性验证
Table 1 Grid independence test

方案	网格数量	C_p
1	52 000	0.250
2	81 000	0.245
3	130 000	0.231
4	208 000	0.233
5	201 000	0.229

1.3 数值验证

将本文孤立萨沃纽斯风力机的数值模拟结果与 Sheldahl 等^[24]在 7 m/s 风速下孤立机组性能实验的数据进行对比,结果如图 4 所示。由图可见,在低叶尖速比条件下,模拟结果与实验数据吻合较好;但在较大叶尖速比条件下,模拟结果略高,这和 Ferrari 等^[25]利用二维模拟结果与实验数据的对比情况相类似,主要是因为二维数值模拟没有考虑到三维流动效应及端板的影响。本文主要研究低风速条件下机组的功率输出情况,叶尖速比通常在 1 以下,由图 4 可知此范围内的数值计算误差较小。即使高叶尖速比情况下的计算数值高于实验结果,其误差也仍在可以接受的范围内,因此可认为数值结果能够表征单个机组的性能趋势。本文集群的数值模拟与孤立机组模拟的计算域设置、边界条件选择及模拟方法均一致,仅在机组个数上存在差异,故孤立机组的实验吻合性良好也证明了本文数值模拟边界条件设置、湍流模型选择等的合理性,由此可认为本文萨沃纽斯风力机集群数值仿真的结果是可信、合理的。

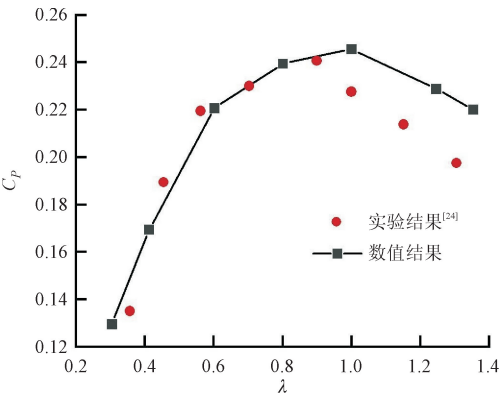


图 4 单台萨沃纽斯机组数值结果与实验结果^[24]的对比
Fig. 4 Comparison between numerical and experimental results^[24] of one Savonius wind turbine

1.4 变转速控制策略

由于机组对流场的干扰以及机组间流场的相互干涉,集群中每台机组感知到的来流风速均不相同,且并非是非自然风速。要保证集群整体获得最大的功率输

出,则需使每台机组持续保持在最佳叶尖速比下运行。

通过 CFD 方法模拟 8 种不同风速下孤立机组的 C_p - λ 曲线,可得到每个风速下达到最大输出功率时的机组最佳转速,如表 2 所示,进而可拟合得到萨沃纽斯风力机的最佳功率曲线,如图 5 所示。基于该最佳功率曲线,本文提出了一种变转速控制策略,即每台机组动态调整自身的转速以适应周围流场,从而使得机组保持在最佳功率曲线上运行,以获得最大的输出功率。

表 2 不同风速下萨沃纽斯机组的最佳转速及最大输出功率

Table 2 The optimal rotational speed and maximum output power of the Savonius wind turbine at different wind speed

风速/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	机组最佳转速/ ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$)	最大输出功率/W
2.0	4.16	2.492
4.0	8.27	10.324
5.0	10.37	16.908
6.0	12.5	33.408
7.0	14.60	49.908
8.0	16.60	74.545
8.5	17.72	89.277
9.0	18.76	107.061

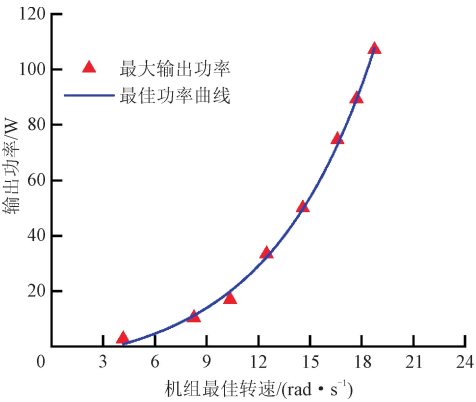


图 5 孤立机组的最佳功率曲线
Fig. 5 Optimal power curve of the isolated turbine

设定机组的切入、切出风速分别为 1、15 m/s,通过收集每台机组在一定时间间隔内的功率输出,根据最佳功率曲线自动调整下一时间段内机组的转速。与传统定转速的集群数值模拟相比,变转速模拟无需给定每台机组的转速,也无需手动调速,其转速通过在 Fluent 软件中编译 UDF 实现自动追踪赋值和动态调整,使得数值模拟结果更符合实际机组的运行情况。

2 集群安装规律探究

为了探究集群在真实风场中最佳的安装角度,对Chen 等^[26]最新提出的萨沃纽斯风力机集群开展多风场、不同方向排布增益分析。集群构型如图 6(a)所示,摆放方向如图 6(b)所示,规定垂直于 1 号机组与 3 号机组连线的箭头指示集群的安装方向。

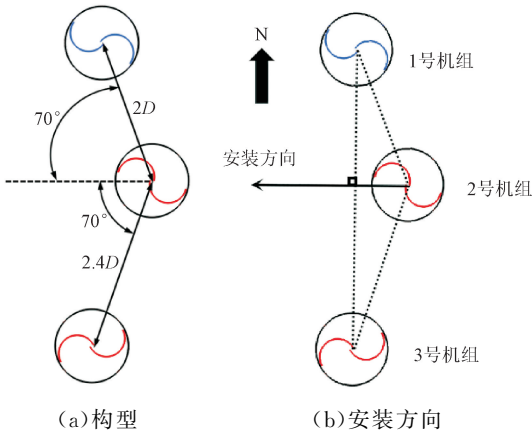


图 6 集群 1 的构型及安装方向

Fig. 6 Configuration parameters and installation direction of cluster 1

2.1 地区选择

选取我国 8 个典型站点 2020 年的风资源数据,对集群不同安装方向的耦合增益情况进行分析,所选城市、气象站编号及经纬度如表 3 所示。所选的 8 个站点分布在我国东北、东南、华东、华中、西北、西南等

各个方位,各地区风速分布与风能分布特点均不相同,基本可以涵盖常见风区的风资源特性。在不同安装方向增益分析中,3 台机组的相对位置始终保持不变。

表 3 8 个站点编号及地理位置
Table 3 Number and location of the 8 sites

序号	城市	站点编号	北纬/(°)	东经/(°)
1	沈阳	54342	41.64	123.48
2	厦门	59134	24.54	118.13
3	昆明	56778	24.99	102.74
4	呼和浩特	53463	40.85	111.82
5	青岛	54857	36.27	120.37
6	喀什	51709	39.54	76.02
7	大连	54662	38.97	121.54
8	郑州	57083	34.52	113.84

图 7 给出了所选 8 个站点的风能玫瑰图,用以反映风能各个风向上的分布,其中,径向坐标表示风能频率,即各风向风能占该地区总风能的百分比,东、南、西、北 4 个方向分别用 E、S、W、N 表示。根据风能频率分布规律可将 8 个站点大致分为以下 4 类地区:第 1 类为具有单一最大风能方向地区,包括厦门、昆明、呼和浩特、喀什;第 2 类为具有两个相位差较大的最大风能方向地区,如青岛;第 3 类为具有 3 个相位差较大的最大风能方向地区,如大连;第 4 类为最大风能方向不明显或风能分布比较平均地区,包括沈阳、郑州。

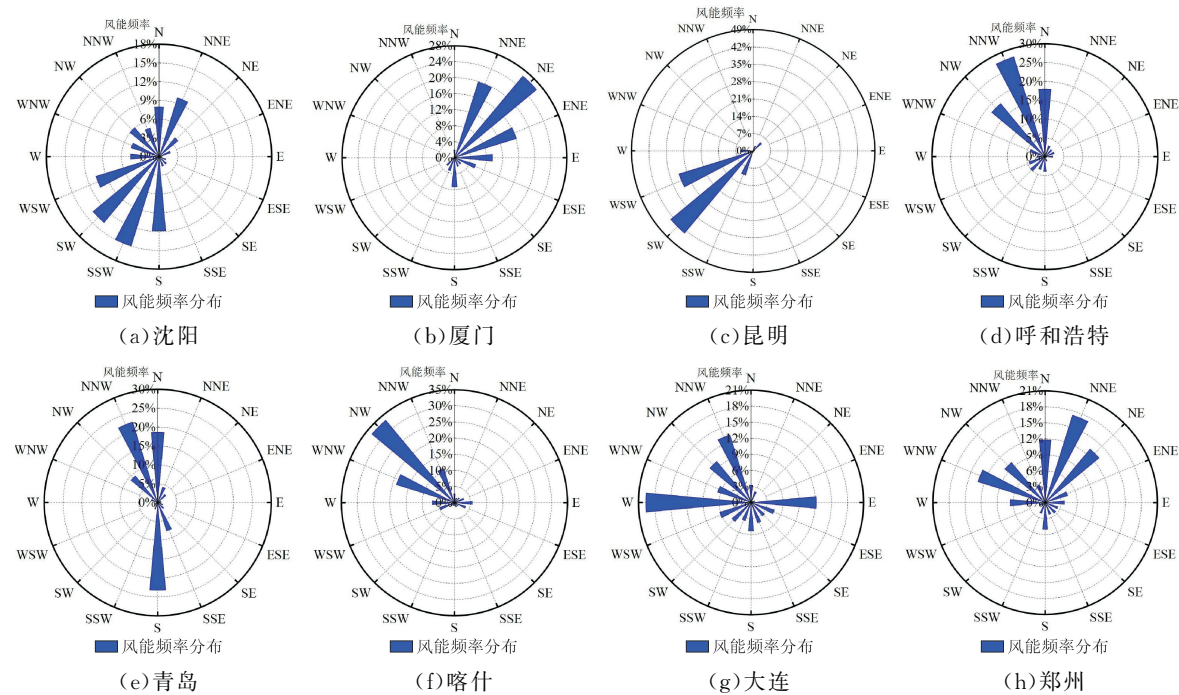


图 7 8 个典型站点的风能玫瑰图
Fig. 7 Wind energy rose charts at 8 sites

2.2 功率拟合

为了方便快速地得到特定风速和风向下萨沃纽斯孤立机组及集群的功率输出,选择典型数据进行 CFD 模拟,通过曲线拟合的方式构建两者的功率预测模型。Kusiak 等^[27]曾指出风力机的理论输出功率与风速的三次方成正比,根据图 5 拟合得到的孤立机组功率预测公式为

$$P_i = 0.145\ 4U_{in}^3 \tag{5}$$

对于集群功率预测模型的构建,考虑到本集群主要应用于低风速区的分布式发电,模拟了在北(N,0°)、北东北(NNE,22.5°)、东北(NE,45°)、东东北(ENE,67.5°)、东(E,90°)、东东南(ESE,112.5°)、东

南(SE,135°)、南东南(SSE,157.5°)、南(S,180°)、南西南(SSW,202.5°)、西南(SW,225°)、西西南(WSW,247.5°)、西(W,270°)、西西北(WNW,292.5°)、西北(NW,315°)、北西北(NNW,337.5°) 16 种风向,2、4、6、8 m/s 4 种风速,共计 64 种工况下集群的运行情况及功率输出情况,以此为基础进行拟合。由于集群分布使得流场更复杂,因此采用三次多项式 $P_c = a_iU_{in}^3 + b_iU_{in}^2 + c_iU_{in}$ 构建其功率预测模型,其中, a_i 、 b_i 、 c_i 为各项系数, $i = 1,2,3$ 。集群中 3 台机组预测公式的系数及可决系数 R_i^2 ($i = 1,2,3$) 如表 4 所示,其中, R_i^2 的值越接近于 1,表示拟合效果越好。

表 4 3 台机组功率预测公式系数及可决系数
Table 4 Coefficients for power predicted formula and coefficient of determination of three wind turbines

风向	1 号机组				2 号机组				3 号机组			
	a_1	b_1	c_1	R_1^2	a_2	b_2	c_2	R_2^2	a_3	b_3	c_3	R_3^2
N	0.114	0.085	-0.170	0.999 9	0.045	0.039	0	0.999 5	0	0	0	
NNE	0.072	0.477	0	0.985 6	0.101	0.425	0	0.992 0	0	0	0	
NE	0.123	0.079	0	0.999 7	0.161	-0.285	0.502	0.999 9	0.155	0.130	-0.300	0.999 9
ENE	0.153	-0.038	0.065	0.999 9	0.147	0.006	0	0.999 9	0.193	-0.081	0	0.999 9
E	0.137	0.163	-0.256	0.999 9	0.114	0.172	0	0.999 5	0.141	0.350	0	0.997 1
ESE	0.159	0.051	0	0.999 8	0.140	0.003	-0.068	0.999 9	0.175	-0.003	0	0.999 9
SE	0.016	0.367	0	0.978 3	0.175	-0.355	0.619	0.999 9	0.195	-0.227	0.454	0.999 9
SSE	0	0	0		0.153	0.000 2	0	0.999 8	0.168	0.070	0	0.999 7
S	0	0	0		0.08	0.518	-0.832	0.999 9	0.118	0.327	-0.726	0.999 9
SSW	0.163	-0.035	0.101	0.999 9	0	0	0		0.145	-0.015	0	0.999 9
SW	0.204	-0.079	0.386	0.999 7	0.173	0.209	0	0.999 3	0.123	0.076	0.023	0.999 9
WSW	0.192	0.077	0	0.999 9	0.216	-0.075	-0.019	0.999 9	0.216	0.083	0	0.999 7
W	0.263	-0.449	0.693	0.999 9	0.209	-0.121	0.264	0.999 9	0.207	-0.296	0.687	0.999 9
WNW	0.195	0.128	0	0.999 4	0.179	0.134	0	0.999 2	0.184	0.05	-0.152	0.999 9
NW	0.206	-0.192	0.292	0.999 9	0.198	0.014	-0.08	0.999 9	0.153	0.36	-0.813	0.999 9
NNW	0.146	0.055	0	0.999 8	0.107	0.112	0	0.998 7	0.180	-0.145	0.325	0.999 9

2.3 不同风向条件的集群流场分析

为了分析集群中机组格挡作用的影响,对 8 m/s 风速下 SSW、NNE、NNW、SSE、N、S 6 个来流风向的平均流场进行分析。

图 8 给出了 SSW、NNE 两个风向的流场图,由图可知,2 号机组和 3 号机组相对位置造成的格挡作用,使得 SSE 风向下 2 号机组处于 3 号机组的尾流区中,而 NNE 风向下则正好相反。尾流区中风速明显降低,造成下游机组可利用的风能资源大幅降低甚至无法启动。

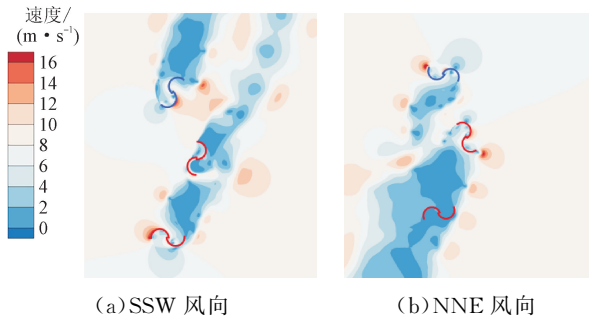


图 8 SSW 和 NNE 风向来流流场图
Fig. 8 Flow field diagram of SSW and NNE wind direction

图 9 所示为 SSE、NNW 两个风向的流场图,两个风向虽然对称,但各机组的运行情况却不一致。由图 9(a)可以看出,SSE 风向下 1 号机组周围流场流速较低,导致前进叶片无法提供足够的驱动力,机组无法正常启动,故转速为 0。而由图 9(b)可以看出,在 NNW 风向下,虽然 2 号机组也受到 1 号机组的尾流影响,但由于两台机组转向相反,使得 2 号机组的前进叶片与 1 号机组的回转叶片在两台机组的间隙处线速度同向,因而提高了间隙处空气的流速,促进了 1 号机组尾流的恢复,进而削弱了对 2 号机组周围流场的不利影响,因此虽然 2 号机组风能利用率急剧下降,但不致停机。

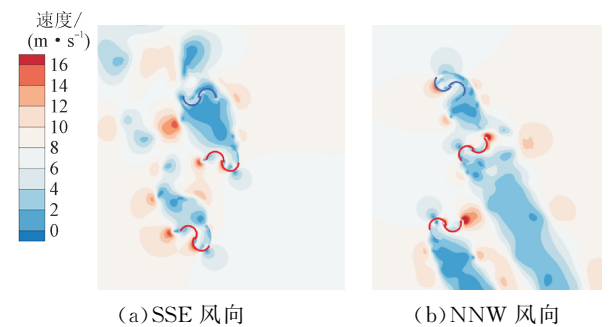


图 9 SSE 和 NNW 风向来风流场图

Fig. 9 Flow field diagram of SSE and NNW wind direction

图 10 给出了 N、S 两个风向的流场图。如图所示,当 N、S 风向来风时,处于下游的两台机组均会受到上游机组的影响,由于相对位置的格挡作用,导致 N 风向来风时的 3 号机组与 S 风向来风时的 1 号机组均因周围流场恢复不佳、空气流速较低等原因无法启动,造成两个风向上集群功率差别的主要原因为 2 号机组在两个工况下的出力差异。由图 10 可知,在 N 风向来风时,流场比较复杂,2 号机组的回转叶片由于受到间隙流的影响,导致凹面压力较低,从而产生反力矩,不利于其正向旋转;而当 S 风向来风时,2 号机组回转叶片受到的阻力不大,且其前进叶片受到了气流较好的推动作用,促进了其正向旋转,从而加强了对风能的捕获和利用,导致集群在 N

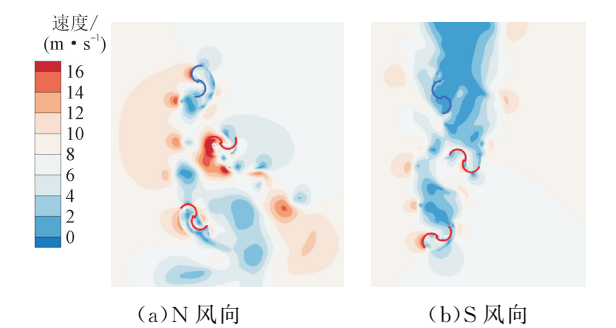


图 10 N 和 S 风向来风流场图

Fig. 10 Flow field diagram of N and S wind direction

风向上的功率输出远小于 S 风向。

由上述流场分析可知,集群中机组的格挡作用会导致下游的机组性能严重下降甚至停转,但由于机组的旋转方向以及机组间距不同,导致对称风向上集群的运转情况并不对称,这也从侧面说明了对集群在全风向的功率输出进行拟合是必要的。

2.4 实际风况下集群安装方向研究

图 11 给出了集群在 4 类地区 8 个站点不同安装方向的平均功率比 $\bar{F}$,即 3 台机组功率比的算术平均值。图中蓝色数据点表示集群在该位置获得最大平均功率比,同时,此位置对应的安装方向即为该集群的最佳安装方向,具体的数据如表 5 所示。由图 11 可见,与孤立萨沃纽斯风力机相比,合理安装萨沃纽斯风力机集群可使输出功率提升 1.2 倍左右。但若摆放不当,集群的输出功率将显著下降,从而造成较大的风能浪费。

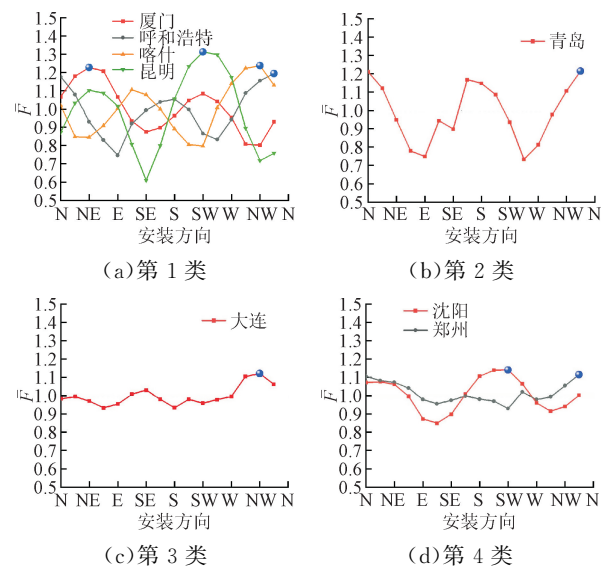


图 11 4 类地区不同安装方向集群的平均功率比

Fig. 11 Cluster average power ratios in different installation directions at 4 types of areas

表 5 8 个站点集群的最佳安装方向及最大平均功率比

Table 5 Optimum installation direction and maximum average power ratio for clusters at 8 sites

序号	城市	最大 风能方向	最佳 安装方向	最大 平均功率比
1	厦门	NE	NE	1.23
2	呼和浩特	NNW	NNW	1.20
3	喀什	NW	NW	1.24
4	昆明	SW	SW	1.31
5	青岛	S	NNW	1.21
6	大连	W	NW	1.12
7	沈阳	SSW	SW	1.14
8	郑州	NNE	NNW	1.11

由图 11(a)可知,对于具有单一最大风能方向的厦门、呼和浩特、喀什、昆明,集群正对该方向安装便可获得较为明显的增益效果,其平均功率比分别为 1.23、1.20、1.24、1.31。对具有两个风能频率较大方向的青岛,朝向 NNW 方向安装时集群可获得最大的风能利用率,这主要是因为集群对反向来风的增益相当,但 N、NW 方向上仍具有较大风能,正对 NNW 方向摆放时可以更充分的利用其周围 45° 范围内的风能,如图 11(b)所示。属于第 3 类地区的大连在 W、E、NNW 方向上风能均比较丰富,由图 11(c)可以看出,集群朝向大部分方向摆放时的平均风能利用率均不如孤立机组,而朝向 NW 方向摆放时的输出功率相较于孤立机组有所提高,平均功率比为 1.12,这主要因为大连的 3 个主风能风向夹角约为 90° ,当朝向这 3 个方向摆放时均会由于格挡作用导致一到两个方向上的风能利用不充分,而朝向风能不那么充足的 NW 方向摆放时,反而使集群对上述 3 个方向上风能的利用率均有所增加,故集群可获得最大平均功率比。郑州没有明显的最大风能方向,若要使集群获得最大的风能利用率,就要避免在集群中机组相互格挡的方位上出现较丰富的风能,因此如图 11(d)所示,当集群正对 NNW 方向安装时可获得最大的风能利用率,因为该方向可以使集群充分捕获 NW、WNW、N、NNE、NE 方向上的风能。

由以上分析可知,风能频率分布对集群在自然风场中的安装方向起关键性作用。当风场有单一最大风能方向时,集群正对此方向摆放可获得最大风能利用率;当风场有两个相位差较大的主风能风向时,选择两者中周围风能更丰富的方向排布可获得更大的功率输出;对于有 3 个主风能风向、主风能风向不明显或风能分布比较均匀的地区,则应避免在机组相互格挡的方位上出现较大的风能分布,集群安装方向处于较为丰富的风能区即可获得较好的增益效果。

3 规律普适性研究

为了验证上述集群安装规律对三角形萨沃纽斯风力机集群的普适性,选取了两种确有增益效果的集群,以相同方式预测了他们在上述 4 类地区不同安装方向的增益效果。

3.1 集群构型及安装方向

集群 2、集群 3 中 3 台机组的相对位置关系如图 12 所示。与集群 1 相同,规定垂直于 1 号机组与 3 号机组连线的箭头指示集群的安装方向,集群安装方向改变时 3 台机组的相对位置保持不变。

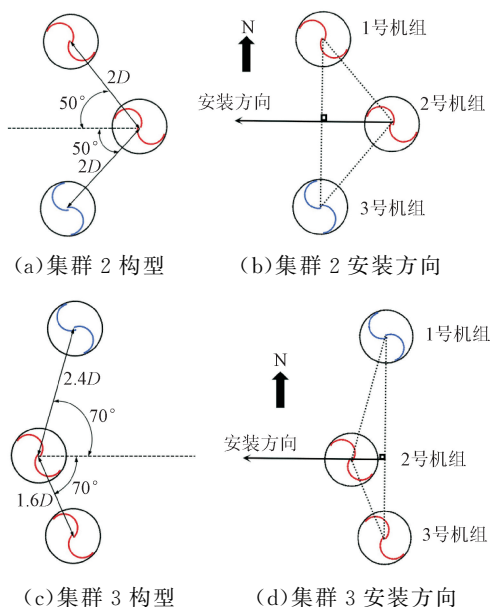


图 12 集群 2 和集群 3 的构型及安装方向

Fig. 12 Configuration parameters and installation direction of cluster 2 and cluster 3

3.2 安装规律验证

计算获得了集群 2、集群 3 在 4 类地区中 4 个典型站点不同安装方向的平均功率比,所选的 4 个站点分别来源于 2.1 节所述的 4 类地区,分别为有单一主风能风向的呼和浩特、有 2 个相位差较大主风能风向的青岛、有 3 个相位差较大主风能风向的大连以及主风能风向不明显的郑州。两个集群在不同地区站点的功率输出如图 13 所示。

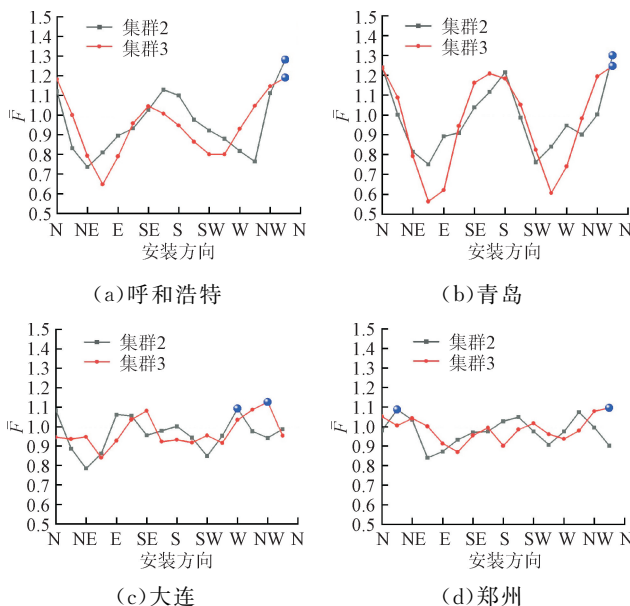


图 13 4 个典型站点不同安装方向集群的平均功率比
Fig. 13 Cluster average power ratios in different installation directions at 4 sites

由图 13 可知,在不同地区,集群 2 和集群 3 在不同安装方向下的平均功率比具有相似的趋势。由图 13(a)可知,在呼和浩特,集群 2、集群 3 正对主风能 NNW 方向安装时具有最大的增益效果,平均功率比分别为 1.28、1.21。对于青岛,其在 NNW、S 风向上风能分布都很丰富,如图 13(b)所示,在不同的安装方向上,集群 2 与集群 3 表现出与集群 1 相同的情况,即正对 NNW 方向安装时具有最大的增益效果,平均功率比分别为 1.32、1.26。对于大连和郑州,两地没有突出的主风能风向,集群 2、集群 3 在大部分安装方向上功率输出效果均不佳,所以与集群 1 相同,若想实现较充分的风能利用,两种集群的安装方向要慎重选择。由图 13(c)可知,在大连,当集群 2 正对 W 方向排布时可获得最佳风能利用效果,平均功率比为 1.09,这是因为集群 2 在 $\pm 45^\circ$ 和 $\pm 135^\circ$ 安装方向上均出现了明显的格挡效应,而大连具有 3 个最大风能风向,当朝向任一方向安装时,均会使得一部分风能不能得到充分利用,当朝向 W 方向安装时,在出现格挡效应的方向上未出现最大风能分布,且可充分利用 W、E 两个方向上的风能,所以集群增益效果较好。同样地,当集群 3 朝向 NW 方向安装时,可充分利用 3 个最大风能方向上的风能,同时最大程度上削弱了格挡效应对集群功率输出的影响,平均功率比为 1.12。在郑州,没有明显的主风能风向,风能主要分布在从 W 方向到 NE 方向区域内,而在此方向区间内,集群 2 正对任一方向排布均会受格挡效应的影响,当朝向 NNE 安装时,如图 13(d)所示,由于格挡效应的存在,虽然对 WNW 方向上的风能利用不充分,但很大程度上降低了 $\pm 45^\circ$ 安装方向上格挡效应造成的损失,因此集群整体平均功率输出较好,平均功率比可达到 1.08。上述分析依然适用于集群 3,当朝向 NNW 方向安装时,最大程度上削弱了格挡效应对集群功率输出的影响,与集群 1 相同,该方向排布可使其相对充分地利用风能,所以集群平均功率比最大,为 1.07。

综上所述,集群 2、集群 3 在 4 类地区中 4 个典型站点最佳安装方向出现的原因和集群 1 是相同的,这也说明了 2.4 节中安装方向选择规律对三角形萨沃纽斯风力机集群具有普适性。

4 结 论

本文基于变转速控制策略和 CFD 数值仿真,评估了萨沃纽斯风力机集群在不同地理位置、不同风

况条件下 4 个地区 8 个典型站点的输出功率,并以此为基础总结了在不同风况条件下集群安装方向的选取规律,进一步证明了该规律对三角形萨沃纽斯风力机集群的普适性,得到的主要结论如下。

(1)在沈阳、厦门、昆明、呼和浩特、青岛、喀什、大连、郑州 8 个站点,萨沃纽斯风力机集群 1 的最大平均功率比 $\bar{F}$ 分别为 1.14、1.23、1.31、1.20、1.21、1.24、1.12、1.11,说明在真实风场中通过合理的集群安装可以实现耦合增益,从而提高机组风能利用率。

(2)集群的安装方向取决于风能频率分布规律。对于有单一最大风能方向的地区,集群应正对此方向安装,收益为孤立风力机的 1.2 倍左右;对于有两个相位差较大的主风能风向地区,选择周围风能更丰富的方向排布集群;对于有 3 个主风能风向、主风能风向不明显或风能分布比较均匀的地区,首先应使机组相互格挡的方位避开风能相对集中区,然后将集群朝向风能资源比较丰富的方向排布,得到的平均功率比可达到 1.05 以上。

(3)在呼和浩特、青岛、大连、郑州 4 个站点,得到按照上述布局规律摆放的集群 2 的平均功率比分别为 1.28、1.32、1.09、1.08,集群 3 的平均功率比分别为 1.21、1.26、1.12、1.07。此结果表明,得到的真实风场中的布局规律对三角形萨沃纽斯风力机集群具有一定的普适性,能为复杂风场条件下集群的安装方向选择提供参考依据。

参考文献:

- [1] 林伯强,杨梦琦. 碳中和背景下中国电力系统研究现状、挑战与发展方向 [J]. 西安交通大学学报(社会科学版), 2022, 42(5): 1-10.
LIN Boqiang, YANG Mengqi. China's power system research in the context of carbon neutrality: current-status, challenges, and development direction [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University(Social Sciences), 2022, 42(5): 1-10.
- [2] 郭烈锦,赵亮. 基于可再生能源的分布式多目标供能系统(一) [J]. 西安交通大学学报, 2002, 36(5): 441-445, 451.
GUO Liejin, ZHAO Liang. Distributed multi-objectives power system based on renewable energy(1) [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2002, 36(5): 441-445, 451.
- [3] 李春,叶舟,高伟,等. 现代陆海风力机计算与仿真 [M]. 上海:上海科学技术出版社, 2012.

- [4] 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.
JIANG Hongzhi, ZHANG Yu, CHEN Jian, et al. Study on the effect of vertical staggered wind turbine on the performance of downstream wind turbine [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(5): 107-114.
- [5] 朱建勇, 刘沛清. 180°螺旋式 Savonius 风力机气动特性试验研究 [J]. 机械工程学报, 2020, 56(8): 155-161.
ZHU Jianyong, LIU Peiqing. Experimental study on aerodynamic characteristics of helical Savonius rotor with twist of 180° [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2020, 56(8): 155-161.
- [6] 田甜, 孙翀, 竺晓程, 等. 垂直轴风力机尾迹的时空特性 [J]. 动力工程学报, 2023, 43(3): 341-348.
TIAN Tian, SUN Chong, ZHU Xiaocheng, et al. The spatial-temporal evolution of the vertical axis wind turbines wake [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2023, 43(3): 341-348.
- [7] 张立军, 马东辰, 赵昕辉, 等. 小型 H 型垂直轴风力机变桨机构的优化设计与试验 [J]. 西安交通大学学报, 2018, 52(3): 132-138.
ZHANG Lijun, MA Dongchen, ZHAO Xinhui, et al. Optimal design of pitch mechanism for H-type vertical axis wind turbine [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2018, 52(3): 132-138.
- [8] 郑迪. 基于 CFD 的 Savonius 风机叶片优化研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [9] 王军, 仁飘零, 王兴双. 一种新型垂直轴风力机的 CFD 分析 [J]. 工程热物理学报, 2012, 33(1): 63-66.
WANG Jun, BINYET E, WANG Xingshuang. CFD study of a new type of vertical axis wind turbine [J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2012, 33(1): 63-66.
- [10] 王伟, 宋保维, 毛昭勇, 等. Savonius 风机叶轮双侧外形优化设计 [J]. 哈尔滨工程大学学报, 2019, 40(2): 254-259, 272.
WANG Wei, SONG Baowei, MAO Zhaoyong, et al. Optimization of Savonius wind turbine impeller with bilateral contour [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2019, 40(2): 254-259, 272.
- [11] 汪泉, 甘笛, 杨书益, 等. 考虑攻角范围的垂直轴风力机叶片翼型优化设计 [J]. 农业工程学报, 2020, 36(24): 38-45.
WANG Quan, GAN Di, YANG Shuyi, et al. Optimized design of H-VAWT blade airfoils profile considering range of angle of attack [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, 36(24): 38-45.
- [12] JEON K S, JEONG J I, PAN J K, et al. Effects of end plates with various shapes and sizes on helical Savonius wind turbines [J]. Renewable Energy, 2015, 79: 167-176.
- [13] 马祺敏, 王加浩, 张洋, 等. 风力机翼型仿生襟翼的结构参数优化设计及气动性研究 [J]. 西安交通大学学报, 2022, 56(11): 31-40.
MA Qimin, WANG Jiahao, ZHANG Yang, et al. Research on optimized design of structural parameters and aerodynamics of wind turbine airfoil with bionic flap [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2022, 56(11): 31-40.
- [14] SALLEH M B, KAMARUDDIN N M, MOHAMED-KASSIM Z. The effects of a deflector on the self-starting speed and power performance of 2-bladed and 3-bladed Savonius rotors for hydrokinetic application [J]. Energy for Sustainable Development, 2021, 61: 168-180.
- [15] ALTAN B D, ATILGAN M. A study on increasing the performance of Savonius wind rotors [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2012, 26(5): 1493-1499.
- [16] 曹开元. 装有可摆动挡风片的 Savonius 风轮静态转矩的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2012.
- [17] 郭朋华, 王逸远, 张大禹, 等. 阿基米德水轮机阵列的耦合增益效应研究 [J]. 西安交通大学学报, 2023, 57(4): 133-141.
GUO Penghua, WANG Yiyuan, ZHANG Dayu, et al. Study on coupling gain effect of Archimedes screw turbine array [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2023, 57(4): 133-141.
- [18] ZHENG Y, BAI H L, CHAN C M. Optimization of Savonius turbine clusters using an evolutionary based genetic algorithm [J]. Energy Procedia, 2019, 158: 637-642.
- [19] SHAHEEN M, EL-SAYED M, ABDALLAH S. Numerical study of two-bucket Savonius wind turbine cluster [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 137: 78-89.
- [20] ZHANG Baoshou, SONG Baowei, MAO Zhaoyong, et al. A novel wake energy reuse method to optimize the layout for Savonius-type vertical axis wind turbines [J]. Energy, 2017, 121: 341-355.
- [21] MEREU R, FEDERICI D, FERRARI G, et al. Parametric numerical study of Savonius wind turbine interaction in a linear array [J]. Renewable Energy, 2017,

113: 1320-1332.

[22] GOLECHA K, ELDHO T I, PRABHU S V. Study on the interaction between two hydrokinetic Savonius turbines [J]. International Journal of Rotating Machinery, 2012, 2012: 581658.

[23] BELABES B, YOUCEFI A, PARASCHIVOIU M. Numerical investigation of Savonius wind turbine farms [J]. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2016, 8(5): 053302.

[24] SHELDAHL R E, BLACKWELL B F, FELTZ L V. Wind tunnel performance data for two-and three-bucket Savoniusrotors [J]. Journal of Energy, 1978, 2(3): 160-164.

[25] FERRARI G, FEDERICI D, SCHITO P, et al. CFD study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis [J]. Renewable Energy, 2017, 105: 722-734.

[26] CHEN Yunrui, GUO Penghua, ZHANG Dayu, et al. Power improvement of a cluster of three Savonius wind turbines using the variable-speed control method [J]. Renewable Energy, 2022, 193: 832-842.

[27] KUSIAK A, ZHENG Haiyang, SONG Zhe. On-line monitoring of power curves [J]. Renewable Energy, 2009, 34(6): 1487-1493.

(编辑 刘杨 李慧敏)