

DOI: 10.13718/j.cnki.xdzk.2023.04.022

渝东南山地风能资源及风切变研究

孙凡¹, 李兴隆², 肖强³, 何帅⁴

- 重庆人文科技学院 教育督导与评估建设办公室, 重庆 合川 401524;
- 四川嘉源生态发展有限责任公司, 成都 610072;
- 西华师范大学 生态研究院, 四川 南充 637002; 重庆人文科技学院 科研处, 重庆 合川 401524

摘要: 根据渝东南地区某山地风电场内 5 个测风塔的测风数据, 按照《风力发电场设计规范》(GB51096-2015), 对该地区风能资源各参数进行计算和分析。研究表明: 该地区月平均风功率密度在 97.66~337.89 W/m² 范围内, 该风电场区域风功率密度等级为 2 级。风电场测风区域基本上呈现出低层风切变指数高, 高层风切变指数低的规律。该风电场风能分布集中, 风能资源较为丰富且可利用性大, 具有较好的开发利用潜力。

关键词: 渝东南; 山地; 风场; 风能资源; 风切变

中图分类号: TM614

文献标志码: A

文章编号: 1673-9868(2023)04-0226-05

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Study on Wind Energy Resources and Wind Shear in Mountainous Area of Southeast Chongqing

SUN Fan¹, LI Xinglong², XIAO Qiang³, HE Suai⁴

- Office of Education Supervision and Evaluation Construction, Chongqing College of Humanities, Science & Technology, Hechuan Chongqing 401524, China;
- Sichuan Jiayuan Ecological Development Co. Ltd., Chengdu 610072, China;
- Institute of Ecology, China West Normal University, Nanchong Sichuan 637002, China;
- Scientific Research Division, Chongqing College of Humanities, Science & Technology, Hechuan Chongqing 401524, China

Abstract: Based on the wind measurements of five wind towers in a mountain wind farm in southeast Chongqing, According to "Wind farm design code" (GB51096-2015), the parameters of wind energy resources in this area were calculated and analyzed. Research shows: the average monthly wind power density in the region ranges from 97.66 W/m² to 337.89 W/m², the regional wind power density of this wind farm is Grade 2. The wind energy distribution of the wind farm is concentrated, the wind energy resources

收稿日期: 2022-11-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(42171045); 重庆市教委重大科技项目(KJZD-M202201801); 重庆市教委重点科技项目(KJZD-K202001801)。

作者简介: 孙凡, 博士, 教授, 主要从事可持续发展研究。

are rich and available. It has good development and utilization potential. The wind measuring area of wind farm basically presents the law of high wind shear index in lower layer and low wind shear index in upper layer.

Key words: southeast of Chongqing; the mountains; wind field; wind energy resources; wind shear

由地球表面受热不均衡而引起的空气流动产生的风能是一种非常安全、清洁、充裕、稳定的能源, 风力发电是新能源领域中最成熟、最具规模 and 商业化发展前景的发电方式。目前, 风能是可再生能源中发展最迅猛的清洁能源^[1-3], 风力发电已经成为利用风能资源的主要形式, 受到世界各国的高度重视。风力发电对于节约能源、减缓温室效应、减少环境污染以及如期实现我国 2030 年前“碳达峰”、2060 年前“碳中和”目标等方面具有重要意义^[4-5]。

渝东南地区有着较为丰富的风能资源, 对其充分地开发和利用对重庆以及我国的可持续发展具有重大的战略意义。

1 数据来源

采用渝东南地区某山地风电场内 5 个测风塔连续 2 年的测风数据进行分析。根据《风电场风能资源评估方法》(GB/T18710-2002)标准, 对 5 个测风塔数据的一致性、合理性进行判别, 并且对重大天气过程, 如强冷空气、热带气旋等天气条件下风速的合理性进行判断, 选用符合实际情况的有效数据, 进而回归原始数据。根据测风塔的相关关系以及可供参考的传感器同期记录数据, 分析、处理、整理出测风塔的实测风速及风向数据, 使其有效数据完整率达到 100%。

2 风能资源

根据《全国风能资源评价技术规定》中关于风电场风能资源的评估方法《风力发电场设计规范》(GB51096-2015)、《风电场气象观测及资料审核、订正技术规范》(QX/T74-2007)、《风电场工程风能资源测量与评估技术规范》(NB/T31147-2018)^[6-8], 按照测定的平均风速、有效小时数计算风功能密度等指标参数, 用以评估风能资源^[9-12]。

在风能资源评估中, 平均风速为:

$$v_E = \frac{1}{n} \sum_{z=1}^n v_z \quad z = 1, 2, \dots, n \quad (1)$$

式(1)中: n 为平均风速在设定时段内的记录数; v_z 为风速观测序列 z 的风速。根据实测风速数据, 结合式(1), 得出渝东南山地某风电场月平均风速如表 1 所示。

表 1 渝东南某风电场 5 座测风塔 70 m 高度平均风速

参数	月份						
	1	2	3	4	5	6	
月平均风速/(m·s ⁻¹)	5.89	6.94	7.34	6.67	7.06	6.43	
参数	月份						
	7	8	9	10	11	12	平均
月平均风速/(m·s ⁻¹)	7.81	7.75	8.26	6.90	6.37	5.46	6.92

根据表 1 可进一步算出该风电场的年平均风速为 6.92 m/s, 并可知 2, 3, 5, 7, 8, 9 月的月平均风速高于全年月平均风速, 12 月、1 月的月平均风速稍低, 但全年月平均风速变化不大。

平均风功率密度为:

$$W = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho v_i^3 \quad (2)$$

式(2)中: v_i 为风速序列, ρ 为月平均空气密度, n 为平均风速在设定时段内的记录数.

结合式(2), 得出该风电场月平均风功率密度如表 2 所示.

表 2 该风电场月平均风功率密度

参数	月份						
	1	2	3	4	5	6	
月平均风功率密度/(W·m ⁻²)	122.35	200.21	237.07	177.88	211.5	159.81	
参数	月份						
	7	8	9	10	11	12	平均
月平均风功率密度/(W·m ⁻²)	285.61	279.30	337.89	197.11	155.38	97.66	198.65

风功率密度蕴含着风速, 而风速频率分布和空气密度的影响是衡量风电场风能资源的综合指标. 由表 2 可知, 风场区 2,3,5,7,8,9 月的月平均风功率密度大于 200 W/m², 风能资源丰富. 4,6,10,11 月, 月平均风功率密度在 150~200 W/m² 之间, 风能资源次丰富. 1 月份月平均风功率密度在 100~150 W/m² 之间, 属风能资源可利用级别. 在风能资源可利用时段, 有效风功率密度虽然较低, 但对于电能紧缺地区还是有相当的利用价值.

从风速分布来看, 5 座测风塔 70 m 高度全年有效风速 3.0~25 m/s 时数分别为 7 170 h, 7 208 h, 7 386 h, 7 626 h, 7 297 h; 分别占全年时数的 81.8%, 82.3%, 84.3%, 87.1%, 83.3%, 平均为 83.76%. 根据《风电场工程风能资源测量与评估技术规范》(NB/T31147-2018)风功率密度等级评判标准, 该风电场区域风功率密度等级为 2 级. 由此可知, 该风电场全年发电量变化不大, 风能资源较为丰富且可利用性较大.

“风压”是垂直于气流方向的平面所受到的风的压力, 亦是计算风力机载荷的重要参数. 风压以单位面积上风压的动压来表示:

$$P = \frac{1}{2}\rho v^2 \quad (3)$$

即风压增加是按风速增加的二次方增加. 由式(3)可得到该风电场月平均风压如表 3 所示.

表 3 该风电场月平均风压

参数	月份						
	1	2	3	4	5	6	
月平均风压/(N·m ⁻²)	20.79	28.86	32.31	26.68	29.94	24.84	
参数	月份						
	7	8	9	10	11	12	平均
月平均风压/(N·m ⁻²)	36.58	36.04	40.92	28.57	24.38	17.89	28.72

各测风塔 70 m 高度平均风功率(7 月)日变化曲线见图 1. 从图 1 中可以看出, 各测风塔风功率密度日变化趋势, 下午 15 点左右风功率密度开始增大, 最大值出现在 20 点至次日 3 点间. 就总体情况而言, 风功率密度在晚上 20 点至翌日凌晨 3 点较高, 13 点至 14 点风速较低.

3 风切变指数

风力发电主要是利用近地层中风的动能资源, 而近地层风速因大气运动自身特性

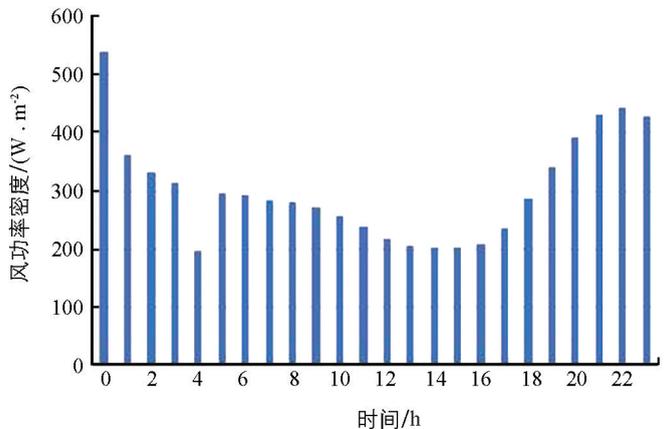


图 1 测风塔 70 m 高度平均风功率密度日变化曲线

以及下垫面环境的影响,在近地层不同高度往往呈现出气流随高度不均匀分布的特性.造成风速在近地层中垂直变化的动力因素,主要源于地面的摩擦效应,即地面粗糙度,而热力因素主要影响的是近地层大气垂直稳定度.当大气层结为中性时,湍流将完全依靠动力原因来发展^[13-16].风切变不但是制约风机性能的重要参数,而且是影响风电效益发挥的重要因素^[17].渝东南地区山地地形千差万别,大环流形势也不尽相同,切变指数往往存在较大差异.此外,不同季节、同一天不同时段风切变指数也存在差异.要进行风电场科学、合理的布设,需要掌握不同状况下风切变的特征和变化规律.本文采用国家质量监督检验检疫总局发布的国标《风电场风能资源评估方法》(GB/T18710-2002)幂律公式,计算近地层风速随高度呈指数变化的规律^[6].其表达式为:

$$V_2 = v_1 \left[\frac{z_2}{z_1} \right]^\alpha \quad (4)$$

式(1)经数学变换可得:

$$\alpha = \frac{\log \frac{v_2}{v_1}}{\log \frac{z_2}{z_1}} \quad (5)$$

式(4)、式(5)中, v_1, v_2 分别为高度 z_1, z_2 处的风速(单位:m/s); α 为风切变指数,其值的大小反映风速垂直切变的强度.

用式(5)计算得到A1,A2,A3号测风塔各高度的风切变指数如表4所示.从表4结果可知,基本上呈现出低层风切变指数高,高层风切变指数低的规律.一般来讲,近地层中最靠近地面的一层风切变指数最大^[17].但是,A3号测风塔[70~10]m层结的切变指数明显高于(70~50)m,[50~25]m层结的风切变指数,其原因可能是由于风流经过山脊、山谷、陡崖等特殊地形时,某些高度层的风速发生变化,改变了风廓线的形状,进而影响不同高度的风切变指数所致.

表4 测风塔各高度的风切变指数

$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$

测风塔	[70~10] m	(70~50) m	[50~25] m	(25~10) m
A1号	0.007 0	-0.110 1	0.016 7	0.042 1
A2号	-0.027 8	-0.061 2	-0.036 8	-0.008 7
A3号	0.284 0	0.036 8	0.050 3	0.551 6

值得注意的是,位于山区的测风塔风速切变可能出现负切变,这是由于山区地形复杂多样,风速受局部地形影响显著,即同一地点较高处的风速比较低处的风速低.从表4可知,A2号测风塔所有高度层风切变指数均为负值,这是因为测风塔所处山脊较窄,且一侧为迎风侧,导致10m处平均风速大于25m处、50m处及70m处平均风速.这个结果从图2也可以看出.根据伯努利效应,当气流越过山脊时,气流被压缩并加速,但这个加速效应仅发生在山脊上面相对较薄的气层内^[18-21].

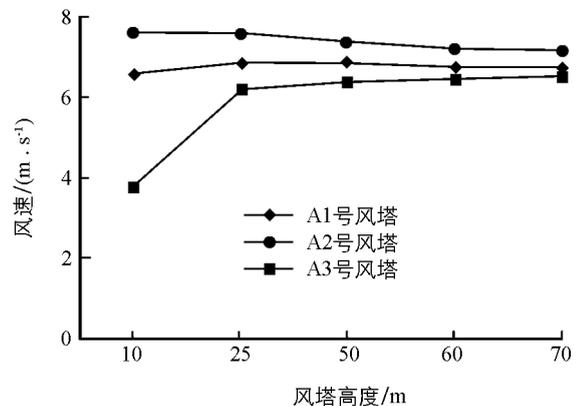


图2 不同测风塔各层高度的风速垂直变化曲线

图2为3个测风塔年平均风速随不同高度的变化

曲线.从图2可知,50~70m高度风速变化趋势不明显.A2号风场整体风速高于其他2个风场.

4 结语

根据渝东南地区某山地风电场内 5 个测风塔的测风数据计算可得,该地区月平均风功率密度在 $97.66 \sim 337.89 \text{ W/m}^2$ 范围内,风电场 2,3,5,7,8,9 月的月平均风功率密度大于 200 W/m^2 ,风能资源丰富.4,6,10,11 月,月平均风功率密度为 $150 \sim 200 \text{ W/m}^2$,风能资源次丰富.该风电场区域风功率密度等级为 2 级.风电场测风区域基本上呈现出低层风切变指数高,高层风切变指数低的规律.

该风电场风能分布集中,风能资源较为丰富且可利用性大,具有较好的开发潜力.

参考文献:

- [1] ANNA G T, GIOVANNI R, THIES PHILIPP R, et al. Life Cycle Assessment of Floating Offshore Wind Farms: an Evaluation of Operation and Maintenance [J]. Applied Energy, 2022, 307: 118067.
- [2] 李晓红.《风能北京宣言》发布 [EB/OL]. (2020-10-14) [2022-10-22]. <http://www.cet.com.cn/wzsy/ycxw/2678231.shtml>.
- [3] 张新房,徐大平,吕跃刚,等.风力发电技术的发展及若干问题 [J]. 现代电力, 2003, 20(5): 29-34.
- [4] 丛明.数值模拟在风电场设计中的应用研究 [J]. 风能, 2017(9): 54-57.
- [5] 胡学敏.测风塔选址及数据采集对风电场产能评估的影响 [J]. 农业工程技术·新能源产业, 2011(2): 21-24.
- [6] 国家质量监督检验检疫总局.风电场风能资源评估方法: GB/T 18710-2002 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [7] 国家能源局.风电场工程风能资源测量与评估技术规范: NB/T 31147-2018 [S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2018.
- [8] 贺德馨,陈坤,张亮亮,等.风工程与工业空气动力学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2006.
- [9] 王必强,陈正洪,孙朋杰,等.湖北省风电场大风速段风资源特征分析 [J]. 可再生能源, 2022, 40(6): 792-797.
- [10] 吉会峰,刘吉堂,宋心刚,等.基于 ERA5 数据的江苏海域风能资源评估 [J]. 太阳能学报, 2023, 44(1): 320-324.
- [11] 蔡继峰,胡高硕,石浩.国内外风能资源评估标准研究综述 [J]. 风能, 2021(12): 54-63.
- [12] 易侃,张子良,张皓,等.海上风能资源评估数值模拟技术现状及发展趋势 [J]. 分布式能源, 2021, 6(1): 1-6.
- [13] 杜吉梁,张克功.基于大数据的风电场风能资源评价方法 [J]. 兰州石化职业技术学院学报, 2017, 17(1): 24-26.
- [14] 黄勇.风电场 50 年一遇最大风速计算方法的探讨 [J]. 电力勘测设计, 2016(S2): 187-190.
- [15] 薛桁,朱瑞兆,杨振斌.沿海陆上风速衰减规律 [J]. 太阳能学报, 2002, 23(2): 207-210.
- [16] 宫靖远.风电场工程技术手册 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [17] 马亮,许丽人,李鲲.铁塔近地层风场特征研究 [J]. 装备环境工程, 2010, 7(5): 20-23, 28.
- [18] 盛其富,楼小波,刘黎明.智能用电信息采集系统建设与应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [19] 刘文,杨慧霞,祝斌.智能电网技术标准体系研究综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(10): 120-126.
- [20] 汪阳.山地风电场风能资源评估研究 [D]. 长沙: 中南大学, 2013.
- [21] 刘昌华.测风塔与风力发电机组风速数据相关性分析 [J]. 内蒙古电力技术, 2012, 30(3): 16-20.

责任编辑 夏娟