

基于 Meteodyn WT 的复杂地形测风塔布置

张照煌, 计新宇, 肖 彧

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

摘要: 风资源分析对于风电场的建立至关重要,而测风数据的获取是风资源分析的重要前提。测风塔的布置方案直接影响了测风数据获取的准确性。文章以复杂地形下某风电场为例,基于计算流体力学(CFD)方法,使用 Meteodyn WT 软件对该风电场的风资源情况进行了模拟。从不同数量、位置测风塔布置方案下的测风塔风速和风电场年发电量两方面进行对比分析。分析结果表明:复杂地形下测风塔所能代表的范围极小,选取代表性测风塔时,须要对不同地形进行分区,建议使用多塔综合的方式;特殊地形下的测风塔不能作为整个风电场的代表性选择,但当出现遮挡或者跨地形的情况时,须要在该位置单独设立一座测风塔从而降低误差。该结果可为复杂地形下的测风塔选址和数量提供参考,从而提高风资源分析的准确性和合理性。

关键词: Meteodyn WT; 测风塔布置; 复杂地形; 发电量计算

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)01-0069-07

0 引言

作为清洁能源,风能具有环境效益好、可再生等优点,风力发电得到了广泛应用,我国风力发电技术也处于快速发展中^[1]。风资源评估作为风电场整体发电性能研究的首要环节,旨在对目标区域内风的自然属性与流动特征进行科学地测量和预估,其评估结果直接影响着整个风场发电量的预测精确度,对研究大规模风电并网、论证风电项目的经济性具有重要意义^[2]。而对风能资源的准确评估和对风电场的优化设计,取决于对风能资源的空间分布有准确和详细地了解^[3]。

目前,国内外风资源评估模型分为线型模型、计算流体力学(CFD)模型、数值天气预报(NWP)模型以及 NWP 和 CFD 耦合模型^[4]。由于能够自适应地生成各种复杂地形上的贴体网格,处理局部的复杂流动,CFD 模型更适应于复杂地形条件下的边界层流场模拟^[5]。作为一种基于非线性流动模型的 CFD 工具,Meteodyn WT 已成为全球风电行业复杂地形风资源评估的标准工具^[6]。目前,使用 CFD 模拟湍流模型的方法主要有 3 种,直接数值模拟(DNS)、大涡模拟(LES)和雷诺平均 Navier-Stokes 模拟(RANS)^[7]。Meteodyn WT 通过在约束边界条件下使用 MIGAL 求解器求解非线性 Navier-Stokes 动量方程来模拟空间风流场,实

现了“耦合分辨率”,同时使用迭代线性方程求解器更新整个计算域的风速分量和压力^[8]。Meteodyn WT 还会根据评估区域的流动特性选择合适的湍流模型。

刘东升^[8]使用 Meteodyn WT 软件对河谷地带某发电场的微观选址进行了研究。黄权开^[9]将基于线型模型的 windpro 软件和 Meteodyn WT 软件结合,对某发电场进行了风能评估和微观选址。冯长青^[10]对基于线型模型的 WAsP 软件和 Meteodyn WT 的适用性进行了研究,得出了 Meteodyn WT 对于风电场的发电量预测更为准确的结论。

已有研究均是在实测测风数据准确,具有代表性的情况下进行的,很少关注测风塔提供的测风数据或者测风塔是否在风电场中具有代表性。数据准确是保证复杂地形下风资源评估准确性的前提。测风塔的位置和数量直接影响其对风电场内其他机位的代表性,这关乎风资源评估的准确性,从而影响风电场建成后的经济收益。因此测风塔的布置方案,即确定测风塔的数量和位置,是测风塔能够代表该风电场风资源评估的关键点。

本文以某个含有山地和平原复杂地形的风电场为例,以不同风速和不同方案模拟的年发电量对测风塔代表性进行了研究,阐述了测风塔位置和数量对风资源评估的重要影响,并且对复杂地

收稿日期: 2023-07-27。

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金项目(2019QN021)。

作者简介: 张照煌(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向为先进施工装备和技术及可再生能源技术。E-mail:zh_zhaohuang@163.com

形下的测风塔选址提出了建议。

1 风电场介绍

该风电场大部分处于低山丘陵,地形起伏较大,少部分处于平原地区,地势较为平坦,总共包含两个风电场区。左侧为风电场 F 区,F 区有两座测风塔,分别是位于北部平原地区的 3# 测风塔和南部山地地区的 5216# 测风塔。右侧为风电场 E 区,E 区有 3 座测风塔,分别是位于北部平原地区的 1419# 测风塔,位于西南山地地区的 6816# 测风塔和位于东南平原地区的 3860# 测风塔。拟选风力机轮毂高度为 140 m。

2 计算方案

2.1 CFD 建模

根据风力发电机组的制造水平、技术成熟程度和价格等因素,结合风电场具体的风况特征、机组的安装和设备运输条件,初步选择单机容量为 2~3 MW 的风电机组进行初选,风电场所在地的海拔为 105~307 m,根据气象站资料,风切变为 0.2~0.3,风电场所在地的极端最低气温为-34.4℃,宜采用低温型机组。最终选择额定功率为 3 MW 的 WTG3000 机组,利用 Meteodyn WT 对布置好的机位进行 CFD 建模,具体参数见表 1。

表 1 Meteodyn WT 软件主要参数
Table 1 Meteodyn WT software main parameter table

参数	数值
地形图	STRM
地形图比例	1:2 000, 1:5 000
扇区	16
投影系	CGCS2000/43 区
半径/km	10
热稳定度	5
最大迭代次数	25

仿真前粗糙度设置为中等粗糙度,选择考虑机组之间的尾流效应,风电场折减系数确定为 0.8。风电场 F 区和 E 区建模后图像分别如图 1,2 所示。

2.2 模型检验

建模完成后,须要对风电场 F 区、E 区模型进行模型检验。根据两个风电场区的测风塔的测风数据分别进行综合计算,将 Meteodyn WT 的计算结果导出到 Windographer FMV,然后对各个测风塔位置处的模拟风廓线与测风塔实测数据的风廓线进行对比(图 3)。

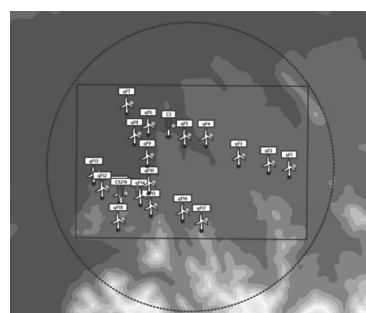


图 1 风电场 F 区建模图像
Fig.1 Modeling image of wind farm zone F

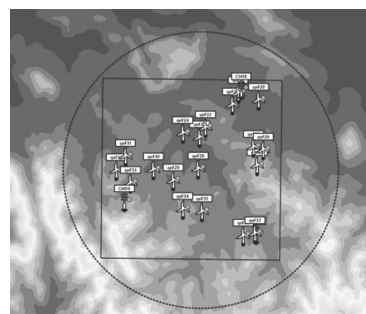
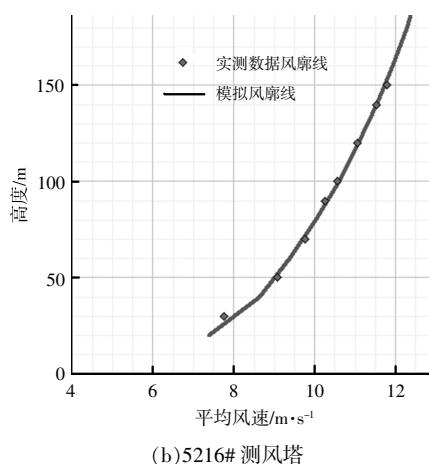
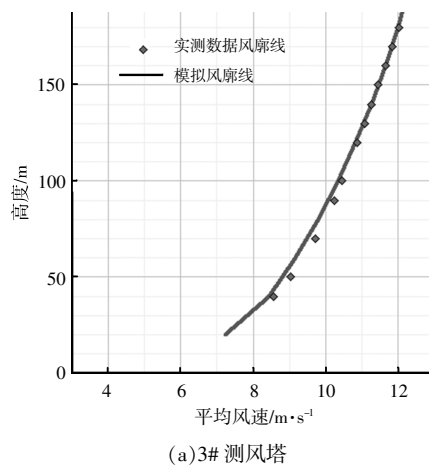
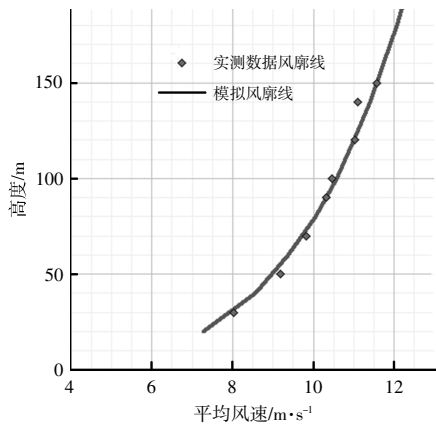
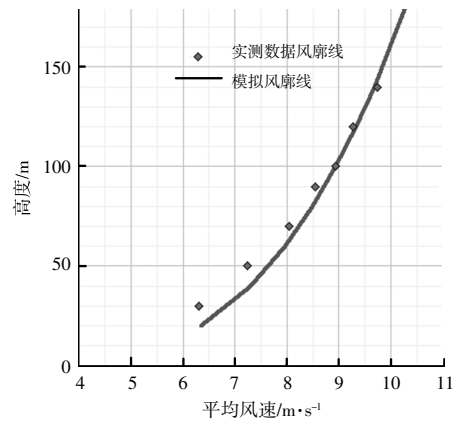


图 2 风电场 E 区建模图像
Fig.2 Modeling image of wind farm zone E

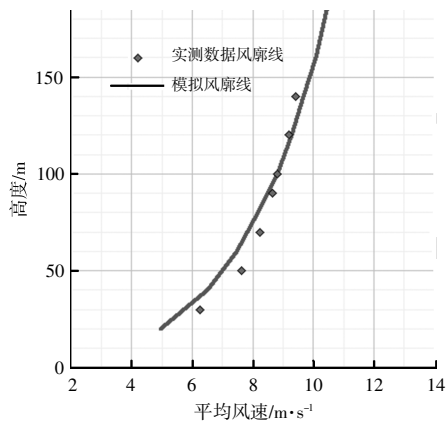




(c)1419# 测风塔



(e)3860# 测风塔



(d)6816# 测风塔

图 3 测风塔模拟风廓线与实测风廓线对比

Fig.3 Comparison of simulated and measured wind profile of wind tower

由图 3 可知,建立的模型模拟风廓线与测风塔实测数据的风廓线相差较小,因此,该模型可以用于对整个风电场的发电量进行计算。

3 测风塔不同布置方案仿真及结果分析

3.1 风电场 F 区

风电场 F 区采用单塔和双塔综合两种方式模拟该场区的风资源分布情况,结果如表 2 所示。首先分别用 3# 测风塔和 5216# 测风塔对该场区

表 2 模拟年发电量与实际年发电量

Table 2 Comparison between simulated annual power generation and actual annual power generation

机位	3# 发电量	误差	5216# 发电量	误差	双塔发电量	误差	实际发电量
	MW·h/a		MW·h/a		MW·h/a		
1	12 036.92	4.33	10 501.73	-8.98	11 487.36	-0.44	11 537.74
2	12 375.74	1.41	11 056.52	-9.40	11 936.44	-2.19	12 203.47
3	12 511.01	5.48	11 134.60	-6.12	12 133.92	2.30	11 860.88
4	12 425.01	0.36	11 167.53	-9.80	12 268.92	-0.90	12 380.73
5	12 381.68	5.32	11 061.32	-5.91	12 313.01	4.74	11 755.88
6	12 421.68	4.65	11 138.45	-6.16	12 325.91	3.84	11 869.61
7	12 683.01	4.12	11 445.22	-6.04	12 413.20	1.91	12 180.90
8	12 578.85	4.63	11 381.07	-5.34	12 284.46	2.18	12 022.57
9	12 479.60	7.95	11 189.78	-3.21	11 993.34	3.74	11 560.83
10	12 365.44	3.08	11 018.60	-8.14	11 291.37	-5.87	11 995.49
11	12 756.91	4.33	11 549.96	-5.54	11 550.07	-5.54	12 227.36
12	12 848.33	9.40	11 635.52	-0.93	11 692.96	-0.44	11 744.54
13	13 157.39	9.63	12 120.59	0.99	12 257.77	2.13	12 001.97
14	12 642.30	6.35	11 440.61	-3.76	11 515.04	-3.13	11 887.59
15	12 160.97	6.89	10 862.11	-4.53	11 034.92	-3.01	11 377.39
16	11 857.68	4.19	10 304.87	-9.46	10 861.68	-4.56	11 381.06
17	13 004.29	2.26	11 884.01	-6.55	12 355.77	-2.84	12 716.64
18	12 353.72	9.01	11 089.28	-2.14	11 158.04	-1.54	11 332.32

的年发电量进行计算,然后在双塔综合情况下对年发电量进行计算,最后与风电场运行 1 a 的实际发电量进行对比。

由表 2 可知:3# 测风塔对平原地区的风力机发电量估算较准,与实际发电量的结果误差较小,但是对山地地区的风力机发电量估算误差较大;5216# 测风塔对山地地区的风力机发电量估算较准,与实际发电量的结果差别较小,但是对平原地区的风力机发电量估算误差较大;双塔综合方式模拟得出的发电量与实际发电量误差最小。

使用 5216# 测风塔模拟得出 3# 测风塔 140 m 高度的计算平均风速为 7.20 m/s,而同时期 3# 测风塔 140 m 高度的实测平均风速为 7.52 m/s,计算值偏低,误差为 4.2%。使用 3# 测风塔模拟得到 5216# 测风塔 140 m 高度的计算平均风速为 8.05 m/s,而同时期 5216# 测风塔 140 m 高度的实际平均风速为 7.34 m/s,计算值偏高,误差为 9.6%。这就是导致发电量产生误差的原因。

通过平原测风塔和山地测风塔分别单独对风电场 F 区的发电量进行计算,可以得出平原和山

地测风塔的代表性结论:使用平原测风塔对年发电量进行评估,最后得到的结果会偏大,使用山地测风塔得到的结果会偏小,相同地形的发电量误差在 5%以下,跨地形的发电量误差在 5%~10%。在考虑经济性的前提下,如果误差在接受范围内,那么可以选择单塔进行发电量评估;如果遇到跨地形的情况而且误差不在允许范围内,仅设立单塔的方案进行发电量评估并不可行。

综上所述,复杂地形风电场受地形影响明显,测风塔所能代表的范围极小。因此,在确定具有代表性的测风塔位置时,须要对不同地形进行分区,这样可以更准确地表示复杂地形风电场的风能资源分布,提高风能资源评价结果的可靠性。

3.2 风电场 E 区

风电场 E 区采用单塔、双塔综合、3 塔综合 3 种方式,模拟该场区的风资源分布情况。

分别用 1419# 测风塔、3860# 测风塔和 6816# 测风塔对该场区的年发电量进行计算,然后与风电场运行 1 a 的实际年发电量进行对比,并计算误差,结果如表 3 所示。

表 3 单塔与实际年发电量
Table 3 Comparison of single tower and actual annual power generation

机位	1419# 发电量 MW·h/a	误差 %	3860# 发电量 MW·h/a	误差 %	6816# 发电量 MW·h/a	误差 %	实际发电量 MW·h/a
19	10 153.09	-5.28	8 670.56	-19.11	10 605.55	-1.06	10 718.99
20	10 053.81	-1.05	8 408.38	-17.25	10 363.44	2.00	10 160.59
21	11 145.26	-7.98	9 692.24	-19.98	11 566.85	-4.50	12 111.69
22	10 917.70	9.42	9 595.36	-3.84	11 451.52	14.77	9 978.23
23	9 704.16	-4.95	8 306.85	-18.64	10 224.00	0.14	10 209.58
24	10 081.52	-2.08	8 635.99	-16.12	10 537.26	2.35	10 295.37
25	11 105.83	0.25	9 749.19	-11.99	11 429.18	3.17	11 077.73
26	11 160.28	-6.47	9 896.00	-17.07	11 551.01	-3.20	11 932.49
27	11 158.06	1.84	9 807.91	-10.48	11 523.60	5.17	10 956.59
28	10 488.13	8.60	9 092.80	-5.85	10 972.85	13.62	9 657.61
29	9 762.81	4.00	8 414.78	-10.36	10 246.30	9.15	9 387.65
30	9 732.78	1.01	8 356.70	-13.28	10 228.00	6.14	9 635.93
31	10 023.38	2.76	8 543.80	-12.41	10 408.78	6.71	9 754.56
32	10 990.17	-5.77	9 655.68	-17.21	11 403.80	-2.22	11 663.24
33	9 805.84	-1.49	8 424.59	-15.37	10 210.11	2.57	9 954.54
34	9 880.27	9.51	8 647.32	-4.16	10 497.88	16.36	9 022.23
35	9 562.09	14.53	8 491.46	1.71	10 183.90	21.98	8 348.77
36	10 295.83	17.70	9 329.51	6.66	10 951.86	25.20	8 747.32
37	9 690.19	20.65	8 512.39	5.99	10 215.41	27.19	8 031.54

由表 3 可知:在只用 1 个测风塔进行发电量计算的情况下,平原测风塔 1419# 对各个机位发

电量的计算结果和风电场实际发电量误差最小;山地测风塔 3860# 计算发电量的结果与实际发电

量误差最大,这是因为 3860# 测风塔的西北角有一座高山遮挡,从而导致推算其他机位的发电量误差过大,再次印证了跨地形情况的误差会变大的结论;山地测风塔 6816# 的计算结果误差在其他两种方案之间。

1419# 测风塔、3860# 测风塔和 6816# 测风塔 140 m 高度的实测平均风速分别为 6.67, 5.89, 5.84 m/s。仅使用 1419# 测风塔模拟得出 3860# 测风塔和 6816# 测风塔 140 m 高度的计算平均风速分别为 6.47, 5.95 m/s, 误差分别为 9.8%, 1.8%; 仅使用 3860# 测风塔模拟得出 1419# 测风塔和 6816# 测风塔 140 m 高度的计算平均风速分别为 5.82, 5.23 m/s, 误差分别为 12.7%, 10.4%; 仅使用 6816# 测风塔模拟得出 1419# 测风塔和 3860# 测风

塔 140 m 高度的计算平均风速分别为 6.68, 6.67 m/s, 误差分别为 0.1%, 13.2%。

综上所述,特定地形区域的测风塔,就如风电场 E 区里的 3860# 测风塔,不能作为整个风电场风能资源评价的代表性测风塔。在遇到类似地形的情况下,若根据实际情况只能设立 1 座测风塔,并且确保发电量计算的误差结果最小,应该选择在平原地区。

将测风塔两两配对得到 3 种方案来计算发电量,方案 1 用 1419# 测风塔和 3860# 测风塔,方案 2 使用 1419# 测风塔和 6816# 测风塔,方案 3 使用 3860# 测风塔和 6816# 测风塔。最后与实际发电量的结果进行对比,结果如表 4 所示。

由表 4 可知:方案 1 计算风电场 E 区的发电

表 4 双塔与实际年发电量结果

Table 4 Comparison of twin towers and actual annual power generation results

机位	方案 1 发电量	误差	方案 2 发电量	误差	方案 3 发电量	误差	实际发电量
	MW·h/a	%	MW·h/a	%	MW·h/a	%	
19	10 142.11	-5.38	10 153.33	-5.28	9 540.74	-10.99	10 718.99
20	10 006.60	-1.52	10 058.18	-1.01	9 166.45	-9.78	10 160.59
21	11 111.37	-8.26	11 150.89	-7.93	10 536.86	-13.00	12 111.69
22	10 686.32	7.10	11 011.37	10.35	10 588.43	6.12	9 978.23
23	9 354.18	-8.38	9 854.35	-3.48	9 382.44	-8.10	10 209.58
24	9 703.32	-5.75	10 260.46	-0.34	9 885.61	-3.98	10 295.37
25	10 669.27	-3.69	11 152.98	0.68	10 212.80	-7.81	11 077.73
26	10 688.66	-10.42	11 221.02	-5.96	10 302.86	-13.66	11 932.49
27	10 392.72	-5.15	11 245.68	2.64	10 150.15	-7.36	10 956.59
28	9 755.13	1.01	10 754.36	11.36	10 095.67	4.54	9 657.61
29	8 985.28	-4.29	10 157.42	8.20	9 832.09	4.73	9 387.65
30	9 047.00	-6.11	10 167.19	5.51	10 015.43	3.94	9 635.93
31	9 369.06	-3.95	10 368.11	6.29	10 255.28	5.13	9 754.56
32	10 336.30	-11.38	11 384.77	-2.39	11 329.98	-2.86	11 663.24
33	9 061.38	-8.97	10 203.36	2.50	10 174.31	2.21	9 954.54
34	8 947.77	-0.83	10 395.52	15.22	9 815.88	8.80	9 022.23
35	8 662.26	3.75	10 014.04	19.95	9 097.49	8.97	8 348.77
36	9 324.92	6.60	10 676.84	22.06	9 346.77	6.85	8 747.32
37	8 500.20	-5.38	9 964.81	24.07	8 512.32	5.99	8 031.54

量误差最小;在缺少 3860# 测风塔的情况下,方案 2 计算得到 36 和 37 机位的发电量误差较大,这是因为高山的遮挡效应,方案中只要加入 3860# 测风塔,发电量误差均会变小。

方案 1 模拟得出 6816# 测风塔 140 m 高度的风速为 5.52 m/s,与实际风速 5.84 m/s 相比,误差为 5.7%,方案 2 模拟得出 3860# 测风塔 140 m 高

度的风速为 6.58 m/s,与实际风速 5.89 m/s 相比,误差为 11.7%,方案 3 模拟得出 1419# 测风塔 140 m 高度的风速为 6.20 m/s,与实际风速 6.67 m/s 相比,误差为 7.0%。

将 3 塔综合模拟得出的发电量与风电场实际运行的发电量进行对比,结果如表 5 所示。

将单塔、双塔和 3 塔共计 7 种方案得到的发

表 5 3 塔与实际年发电量结果对比

Table 5 Comparison of three towers and actual annual power generation results

机位	3 塔发电量	误差	实际发电量	机位	3 塔发电量	误差	实际发电量
	MW·h/a	%	MW·h/a		MW·h/a	%	MW·h/a
19	10 151.67	-5.29	10 718.99	29	9 821.41	4.62	9 387.65
20	10 021.84	-1.37	10 160.59	30	9 983.35	3.61	9 635.93
21	11 125.88	-8.14	12 111.69	31	10 232.61	4.90	9 754.56
22	10 815.77	8.39	9 978.23	32	11 315.41	-2.98	11 663.24
23	9 566.52	-6.30	10 209.58	33	10 168.40	2.15	9 954.54
24	9 982.28	-3.04	10 295.37	34	9 822.99	8.88	9 022.23
25	10 758.59	-2.88	11 077.73	35	9 152.53	9.63	8 348.77
26	10 789.34	-9.58	11 932.49	36	9 354.04	6.94	8 747.32
27	10 540.04	-3.80	10 956.59	37	8 511.40	5.97	8 031.54
28	10 212.52	5.75	9 657.61				

电量误差进行比较,结果如图 4 所示。

由图 4 可知:7 种方案中,3 塔联合进行发电

量计算的方案误差最小;平原测风塔 1419# 和山

地测风塔 3860# 联合模拟计算发电量的方案误差

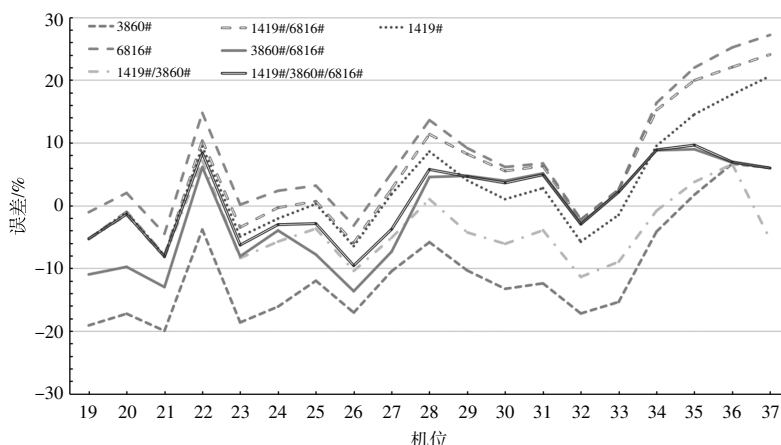


图 4 7 种方案误差汇总

Fig.4 Summary of errors for the seven scheme

次之,在考虑经济性的前提下,可以将山地测风塔 6816# 去除;加入 3860# 测风塔的方案发电量误差会减小。

综上所述,为了保证误差最小,如果出现高山遮挡的情况,高山附近必须设立测风塔,使用多个测风塔进行综合计算时,可以适当减少山地地区测风塔的数量。

4 结论

本文以不同地形测风塔数量、位置布置为研究对象,从不同测风塔方案的风速和理论发电量为出发点,利用 Meteodyn WT 对不同测风塔布置方案进行模拟计算并进行对比,得到以下结论。

①风电场 F 区的平原测风塔推算出的年发电量会偏大,而山地测风塔推算出的年发电量会

偏小,相同地形下的误差在 5%以内,跨地形误差在 5%~10%。复杂地形风电场受地形影响明显,测风塔所能代表的范围极小。在确定具有代表性的测风塔位置时,须要对不同地形进行分区,这样可以更准确地表示复杂地形风电场的风能资源分布,提高风能资源评价结果的可靠性。在考虑经济性的前提下,如果误差在接受范围内,可以选择单塔进行发电量评估。如果遇到跨地形的情况,而且误差不在允许范围内,仅设立单塔的方案进行发电量评估并不可行。

②在风电场 E 区的单塔、双塔和 3 塔布置总共 7 种方案里,使用 3 塔进行发电量计算的方案与实际发电量的结果误差最小,整体误差在 10%以内。通过单塔的 3 个方案对比,若只能设置一座测风塔的情况下,不能选用特殊地形的测风塔,它

不能代表整个风电场的风资源,误差较大。若使用多个测风塔进行综合计算时,可以适当减少山地地区测风塔的数量。遮挡效应对于测风塔的发电量计算影响很大,因此,在出现遮挡效应或者跨地形的情况下,须要在该位置单独设立一个测风塔,从而降低误差。

参考文献:

- [1] 丁昱苇.风力发电发展现状以及行业发展趋势研究[J].光源与照明,2021(3):124-125.
- [2] 韩毅,赵勇,童博,等.复杂地形风场的风资源评估方法与展望[J].热力发电,2020,49(11):139-146.
- [3] 侯金锁,王冠,陈玮,等.激光雷达在不同地形条件下进行风资源评估的适用性研究[J].可再生能源,2022,40(10):1340-1345.
- [4] Jin J X,Li Y 1,Ye L,et al.Integration of atmospheric stability in wind resource assessment through multi-scale coupling method [J].Applied Energy,2023,348:1402-1412.
- [5] 程雪玲.风能模型的发展及 CFD 在风资源开发利用中的应用[J].空气动力学报,2023,41(6):1-15.
- [6] Ayala M,Maldonado J,Paccha E,et al.Wind power resource assessment in complex terrain:Villonaco case-study using computational fluid dynamics analysis[A].3rd International Conference on Energy and Environment Research[C].Barcelona:ICEER,2016.
- [7] Zhang Z,Zhao N,Zhong W.Progresses in application of computational fluid dynamics to largescale wind turbine aerodynamics [J].Applied Mathematics and Mechanics,2013,34(10):1048-1058.
- [8] 刘东升,余波,崔军玲,等.基于 Meteodyn WT 的河谷地带风电场微观选址[J].人民长江,2017,48(S1):190-192.
- [9] 黄权开,卢成志,刘永生,等.基于 WT 与 WindPRO 的风场风能评估与微观选址[J].人民长江,2021,52(6):88-94.
- [10] 冯长青,杜燕军,包紫光,等.风能资源评估软件 WAsP 和 WT 的适用性[J].中国电力,2010,43(1):61-65.

The layout scheme of different terrain wind towers based on Meteodyn WT

Zhang Zhaohuang, Ji Xinyu, Xiao Yu

(School of Energy Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Wind resource analysis is crucial for the establishment of a wind farm, and the acquisition of wind measurement data is an important prerequisite for wind resource analysis. The layout scheme of the wind tower directly affects the accuracy of wind measurement data. Taking a wind farm under complex terrain as an example, based on computational fluid dynamics method, Meteodyn WT software is used to simulate the wind resources of the wind farm, and by comparing and analyzing the wind tower wind speed and annual power generation of the wind farm from different numbers and locations under the layout scheme of wind towers, the results show that the range represented by wind towers in complex terrain is extremely small, and when selecting representative wind towers, it is necessary to divide different terrains, and it is recommended to use the multi-tower comprehensive method. Wind towers in special terrain cannot be used as a representative choice for the entire wind farm, but when there is occlusion or cross-terrain, a separate wind tower needs to be set up at this location to reduce errors. The research results can provide a reference for the site selection and number of wind towers under complex terrain in the future, so as to improve the accuracy and rationality of wind resource analysis.

Keywords: Meteodyn WT; wind tower arrangement; complex terrain; calculation of power generation