

基于风机运行数据的风流场校正方法研究

吴 莎, 万鹏飞, 周秋兰, 余官培, 朱一凡, 汪 健

(湖北省电力勘测设计院有限公司, 湖北 武汉 430040)

摘要: 针对利用CFD风资源分析软件自身模型无法完全修正风资源流场模拟计算误差的情况, 提出了一种风电场流场校正方法, 采用风机实际运行SCADA数据分扇区校正模拟计算风加速因子, 并应用WT软件结合实际风电场运行数据进行了实验验证。结果表明经流场校正后, 场区区域内的各机位处流场计算结果更加贴近于现场记录的实际风况。所提出的流场校正方法能够有利于提高复杂地形的风资源评估准确度, 对项目技改、项目扩容、项目后评估及周边项目建设准确评估区域风资源具有较大的实用价值。

关键词: SCADA数据; 风加速因子; 风流场; 校正; WT软件

Research on wind flow field correction method based on wind turbine operation data

WU Sha, WAN Pengfei, ZHOU Qiulan, YU Guanpei, ZHU Yifan, WANG Jian

(Powerchina Hubei Electric Engineering Co., Ltd., Wuhan 430040, China)

Abstract: In view of the fact that the CFD wind resource analysis software itself model cannot completely correct the wind flow field simulation calculation error in some case, a wind flow field correction method is proposed. The wind turbine acceleration correction factor is calculated by using the wind turbine operating system SCADA data. The experimental results are verified by using WT software combined with the actual wind farm operation data. The results show that after the wind flow field correction, the flow field calculation results at each position in the field area are closer to the actual wind conditions recorded on the site. The proposed method can improve the accuracy of wind resource assessment of complex terrain, and has great practical value for project technical transformation, project expansion, post-project evaluation and surrounding project construction.

Key words: SCADA data; wind acceleration factor; wind flow field; correction; WT software

0 引言

目前风电行业内进行风电场开发时一般是基于数值模拟技术来进行风能资源的评估, 即模拟得出场区的风流场分布情况, 然后结合现场测风塔数据, 计算得出全场各点位处的风能资源特性^[1], 据此进行风电场的开发规划、设计与发电量计算等。实际上不同的模拟模型得出的结果会有差异, 特别是在复杂地形条件下, 实际运行的结果与模拟计算的结果经常出现偏差, 甚至局部

区域对风流场的判断出现较大差异, 而行业现有的风资源模拟计算软件并不能通过计算模型自身的修正完全消除这种偏差^[2-3]。针对这种现象, 考虑到风电场范围内各个点位的风机实际运行SCADA数据, 提供了场区内多个离散点的真实风流特征参数^[4], 可将风机运行数据与流场模拟数据进行结合, 用风机运行数据修正流场模拟结果, 为风机运行数据与流场参数的耦合分析、发电量的重新评估和风电场技改方案的分析确认提

供准确的流场模拟结果^[5]。基于此,本文提出一种风流场校正的方法,并将风机实际运行数据、WT软件计算结果和工程实例进行对比验证。

1 校正原理

1.1 风加速因子

在给定热稳定度条件的情况下,地形地貌对风流的影响与风速水平是无关的。因此,地形地貌对平均风速风向的影响,可以通过比较各点位置处的计算风流相对于参考风的变化程度评估出来。

在场区内选定一个点位作为参考位置,场区其他任何位置定义各方向上的风加速因子为

$$C_i = \frac{V_i}{V_{\text{ref}_i}} \quad (1)$$

式中, C_i 为在某一点相对于风向扇区 i 的参考风的风加速因子; V_{ref_i} 为来风方向风向扇区 i 流过来的参考风; V_i 为在参考风下该点处的风速。

同一个点位处,从不同的方向吹过来的风流由于受到不同的地表影响,该点位处不同风向扇区的风加速因子不同^[6]。

1.2 流场校正技术路线

将风电场范围内各风机点位作为流场校正的目标位置,以各风机运行实际记录的SCADA数据作为场区内多个离散点的真实风流特征参数^[7]。根据风机的SCADA数据,统计得出每个风机点位的各风向扇区的平均风速,然后结合实际情况选择某一参考点,并利用该参考点和其他点位每个扇区的平均风速之间的比例关系和该参考点的相对应扇区的风加速因子推算各点位每个扇区的风加速因子^[8]。基于SCADA数据统计计算的风加速因子是区域流场实际特征,因此该风加速因子也就是流场校正的目标值。然后,结合目标值和原CFD计算结果对该点其他高度对应扇区的风加速因子进行插值推算,同时也对临近点位的风加速因子值进行插值推算,从而保证风加速因子在整场的连续性,最终完成整场的风加速因子值的校正。图1给出了流场校正示例。

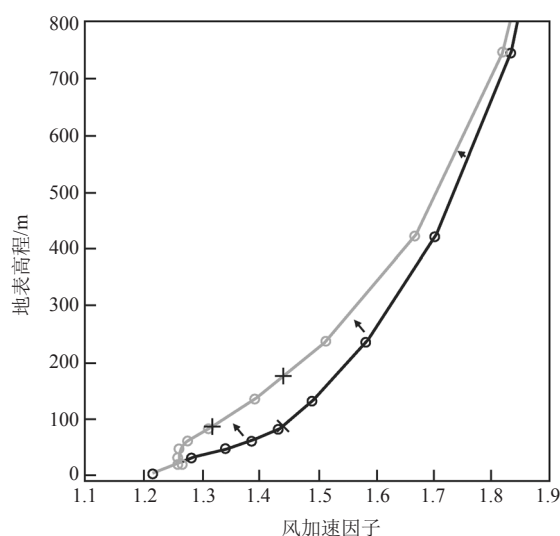


图1 流场校正示例

Fig. 1 Wind flow field correction example

图1中,横坐标为风加速因子;纵坐标为地表高程(单位m);“×”代表的是利用实测SCADA推算得到的某个点位某一扇区的风加速因子(即流场校正的目标值);蓝色实线为未经流场校正的风廓线(即CFD模拟计算得到的理论风廓线);红色实线为经过流场校正后的风廓线。

1.3 校正点位置风加速因子校正方法

校正点风加速因子比例文件中,各点位各扇区风加速因子比例系数为该点在对扇区得到校正后风加速因子与原始风加速因子之比。可通过各点位对应扇区实测风速与校正点位实测风速之比得到

$$R_{\text{dir.CFD}} = \frac{V_{\text{dir.CFD}}}{V_{\text{dir.REF}}} \times \frac{C_{\text{dir.REF}}}{C_{\text{dir.CFD}}} \quad (2)$$

式中, $V_{\text{dir.CFD}}$ 为校正点位(通常为风机点位)处实测的分扇区平均风速; $V_{\text{dir.REF}}$ 为参考点位处实测的分扇区平均风速; $C_{\text{dir.CFD}}$ 为CFD软件模拟的校正点位处的风加速因子; $C_{\text{dir.REF}}$ 为CFD软件模拟的参考点位处的风加速因子。

针对校正点,该校正系数将乘以其CFD模拟结果中的风加速因子,以得到校正后的风加速因子。同时此校正也会考虑设置校正阈值,当校正后的风加速因子超过所设置阈值时,校正数值将

取为设置的校正阈值。

1.4 其他位置风加速因子插值方法

CFD模拟流场的校正不能仅校正用户设置的校正点处的风加速因子,否则将会使得整个流场内的结果不连续。因此针对流场其他位置也需要参考校正点校正后的值进行插值,计算公式为

$$C(\text{dir}, P_{\text{corrected}}) = \sum_{j=1}^n C(\text{dir}, \text{CFD}_{i_{\text{corrected}}}) \times \text{WF}_j \quad (3)$$

式中, $C(\text{dir}, P_{\text{corrected}})$ 为流场内其他点位校正后的风加速因子; $C(\text{dir}, \text{CFD}_{i_{\text{corrected}}})$ 为校正点 j 校正后的风加速因子; WF_j 为根据距离求得的校正点 j 的权重系数。

同时此校正也会考虑设置的校正阈值,当校正后的风加速因子超过所设置阈值时,校正数值将取为设置的校正阈值。

2 结果验证与讨论

以湖北某山地风电场为案例进行验证。收集了该风电场2016~2017年至少两个完整年的实际运行SCADA数据,包括2016年1月1日~2017年12月31日的10 min平均有功功率、平均风速、平均机舱位置、平均机舱风向、平均桨角、平均环境温度、平均发电机转速、平均转子转速和平均齿轮箱油温等参数。

2.1 SCADA数据一致性检验

分析了该风电场各风机SCADA平均风速的对比结果,如图2所示。

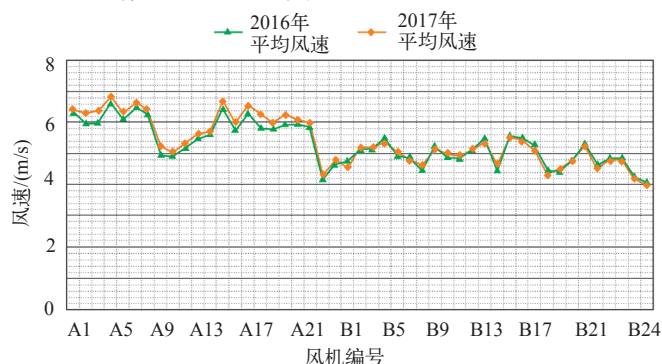


图2 风电场风机SCADA平均风速对比

Fig. 2 Comparison of average wind speed of wind turbine SCADA data

由图2可以看出,风电场风机点位间的SCADA平均风速在2016年与2017年整体趋势一致,即在2016年SCADA平均风速低的风机在2017年其SCADA平均风速仍然较低,反之亦然。对比分析风电场投运以来的统计数据,可以看出风电场年际表现的一致性较好,各风机点位之间记录的实际风速、发电能力的相对关系年际表现比较一致,各机位点处记录的平均风速值能代表各点位处真实的流场特征。

2.2 流场校正

根据各风机SCADA数据统计分风向的平均风速如表1所示。利用每台风机的分风向平均风速数据求算每个机位点对应方向的目标风加速因子值,然后进行流场校正。

用WT风资源分析软件,分别利用未经过流场校正的模型和经过流场校正后的模型进行综合计算,外推得到所有风机点位的理论风速值,并与SCADA实测风速值进行对比,以评估流场校正的效果。由于本项目主导风向为东南风,绝大比例的来风方向集中在135°、157°及周边方向,以该两个方向为例分析校正结果。流场校正前后主导风向的风加速因子的图谱如图3~图6所示。

2.3 流场效果分析

表2给出了逐点位流场校正结果,图7和图8

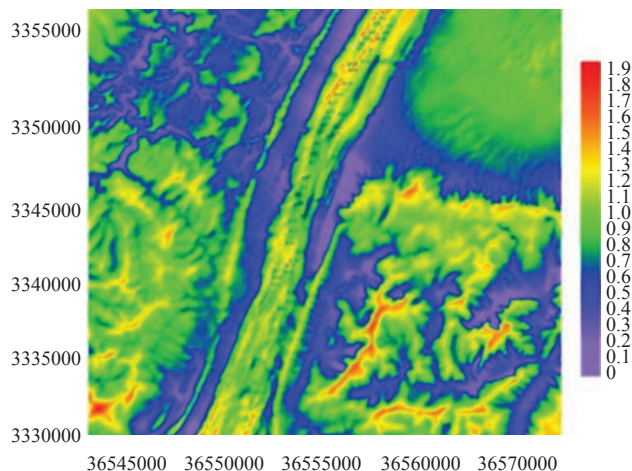


图3 135°方向风加速因子图谱(高度80 m,未校正)
Fig. 3 Wind acceleration factor map at 135° (height 80 m, uncorrected)

表1 SCADA 数据分风向平均风速统计表

Tab. 1 SCADA data wind direction average wind speed statistics

(单位: m/s)

风机	0°	22.5°	45°	67.5°	90°	112.5°	135°	157.5°	180°	202.5°	225°	247.5°	270°	292.5°	315°	337.5°	All
A1	3.0	2.7	3.2	3.7	4.3	7.2	8.8	7.4	4.8	3.1	2.7	3.2	3.3	4.3	4.4	3.8	6.4
A2	2.9	2.5	3.4	3.6	4.1	6.8	8.1	7.0	5.0	3.4	2.8	3.2	3.4	4.2	4.3	3.7	6.1
A3	2.8	2.4	2.8	3.6	4.0	6.8	8.2	7.0	4.8	3.1	2.9	3.2	2.9	4.4	4.2	3.6	6.2
A4	3.2	3.0	3.9	4.1	4.6	7.5	9.0	7.8	5.5	3.8	3.1	3.4	3.7	4.5	4.5	4.0	6.7
A5	3.0	2.6	3.0	3.7	4.1	7.0	8.6	7.2	4.8	3.1	2.4	2.9	3.1	4.0	4.1	3.6	6.2
A6	2.8	2.6	2.9	3.7	4.3	7.3	9.0	7.7	5.2	3.2	2.4	2.7	2.9	3.8	3.8	3.4	6.5
A7	2.9	2.6	3.1	4.0	4.3	7.1	8.6	7.2	5.2	3.4	2.7	2.9	3.1	4.0	3.9	3.6	6.2
A8	2.6	2.0	2.9	2.9	3.2	5.3	6.4	5.4	4.0	2.7	2.2	2.5	2.8	4.3	4.3	3.8	4.9
A9	2.6	2.3	3.0	3.2	3.4	5.2	6.2	5.3	4.0	2.9	2.3	2.6	2.8	4.4	4.4	3.6	4.9
A10	2.6	2.4	3.0	3.3	3.5	5.5	6.6	5.7	4.5	3.1	2.3	2.7	3.0	4.4	4.4	3.9	5.2
A11	2.6	2.5	3.4	3.5	3.9	6.0	7.1	5.9	4.7	3.3	2.6	3.0	3.1	4.6	4.6	3.8	5.5
A12	2.6	2.4	3.0	3.5	3.9	6.1	7.3	6.1	4.6	3.1	2.3	2.6	3.0	4.9	4.7	3.7	5.5
A13	3.1	3.0	3.4	4.2	4.7	7.3	8.9	7.6	5.2	3.7	2.9	3.1	3.2	4.4	4.2	3.6	6.5
A14	2.0	2.1	2.5	3.7	4.0	6.4	7.6	6.4	4.9	2.8	2.3	2.9	3.1	4.5	4.1	2.8	5.7
A15	2.8	2.9	3.4	4.2	4.7	7.0	8.4	7.4	5.4	3.6	2.8	3.1	3.3	4.7	4.7	3.8	6.4
A16	2.0	1.8	2.5	3.8	4.0	6.4	7.7	6.7	4.9	2.8	2.1	2.5	2.1	3.8	3.7	3.1	5.7
A17	2.7	2.6	2.9	4.0	4.4	6.6	7.7	6.7	4.9	3.1	2.6	2.6	2.9	3.9	4.0	3.4	5.8
A18	2.7	2.6	3.1	4.0	4.4	6.5	7.9	7.0	5.1	3.2	2.7	2.9	3.1	4.1	4.1	3.5	6.0
A19	2.5	2.6	3.2	4.2	4.5	6.5	7.7	7.0	5.2	3.4	2.6	2.7	3.0	3.9	4.0	3.4	5.9
A20	2.9	2.9	3.6	4.5	4.7	6.5	7.6	6.9	5.2	3.6	2.9	3.1	3.2	4.0	4.0	3.5	5.9
A21	2.2	2.0	2.2	2.8	3.1	4.2	4.8	4.4	3.6	2.5	2.1	2.1	2.3	3.6	3.7	3.0	4.0
A22	2.5	2.4	2.7	3.3	3.6	4.8	5.6	5.3	4.3	2.7	2.4	2.7	2.8	3.9	3.7	3.2	4.6
A23	2.5	2.5	2.9	3.4	3.6	4.8	5.7	5.5	4.6	3.0	2.4	2.5	2.6	3.8	3.6	3.2	4.7
A24	2.8	2.7	3.0	3.6	4.0	5.3	6.3	5.9	4.8	3.2	2.6	2.8	2.9	3.8	3.7	3.4	5.1
B1	2.7	2.9	3.2	4.0	4.1	5.7	6.7	6.1	4.7	3.4	2.8	2.9	3.0	3.7	3.8	3.4	5.3
B2	2.8	3.0	3.4	4.0	4.2	5.6	6.6	6.1	4.8	3.6	3.0	2.9	3.0	3.8	3.8	3.4	5.3
B3	2.6	2.8	3.2	3.8	4.0	5.4	6.3	5.8	4.4	3.3	2.7	2.7	2.9	3.6	3.6	3.2	5.0
B4	2.4	2.6	3.0	3.6	3.9	5.1	6.0	5.5	4.2	2.9	2.4	2.5	2.7	3.5	3.4	3.0	4.7
B5	2.3	2.4	2.7	3.3	3.5	4.6	5.6	5.3	4.0	2.7	2.2	2.2	2.5	3.3	3.2	2.8	4.5
B6	2.6	2.7	2.9	3.7	4.1	5.3	6.4	6.0	4.6	3.4	2.7	2.6	2.9	3.7	3.4	3.1	5.1
B7	2.4	2.7	3.1	3.8	4.0	5.1	6.2	5.8	4.2	3.0	2.5	2.6	2.9	3.7	3.5	3.0	4.9
B8	2.4	2.5	3.0	3.6	3.8	5.0	6.2	5.7	4.0	3.3	2.7	2.7	2.9	3.8	3.5	3.0	4.8
B9	2.6	2.9	3.3	3.6	3.8	5.0	6.2	5.9	4.5	3.5	2.9	2.7	3.0	3.9	3.8	3.2	5.0
B10	2.6	2.9	3.2	3.6	3.8	5.3	6.5	6.2	4.7	3.8	2.9	3.0	3.1	3.7	3.6	3.1	5.2
B11	2.7	2.9	3.2	3.3	3.3	4.2	5.3	5.1	4.1	3.2	2.7	2.8	3.0	4.1	3.7	3.1	4.4
B12	2.8	3.2	3.7	3.9	4.1	5.6	7.0	6.5	4.8	3.9	3.1	3.2	3.4	4.0	3.8	3.4	5.5
B13	3.0	3.3	3.8	3.9	4.2	5.5	6.8	6.2	4.7	3.9	3.1	3.3	3.5	4.2	4.0	3.5	5.4
B14	2.9	3.1	3.7	3.8	4.1	5.3	6.4	5.9	4.4	3.6	3.0	3.1	3.2	3.9	3.9	3.4	5.1
B15	2.9	3.1	3.3	3.3	3.4	4.2	5.0	4.6	3.7	3.0	2.5	2.8	2.9	3.6	3.6	3.2	4.2
B16	2.9	3.0	3.2	3.4	3.5	4.5	5.3	4.9	3.7	2.8	2.3	2.7	2.9	3.8	3.8	3.3	4.4
B17	3.0	3.0	3.2	3.4	3.8	4.7	5.6	5.1	4.0	3.3	2.8	2.9	3.1	4.0	4.1	3.5	4.6
B18	3.0	3.0	3.3	3.6	3.7	5.3	6.5	5.9	4.3	3.5	2.9	2.9	3.0	3.7	3.9	3.5	5.1
B19	2.7	2.9	3.3	3.5	3.7	4.6	5.4	4.9	3.8	3.2	2.7	2.7	2.8	3.8	4.0	3.4	4.4
B20	2.6	2.7	3.1	3.3	3.5	5.0	6.0	5.3	3.9	2.9	2.7	2.6	2.7	3.6	3.7	3.2	4.7
B21	2.7	2.6	2.9	3.2	3.5	5.0	6.0	5.4	4.0	2.9	2.6	2.5	2.5	3.5	3.7	3.3	4.7
B22	2.8	2.9	3.2	3.1	3.4	4.2	4.9	4.4	3.4	2.8	2.5	2.6	2.6	3.6	3.6	3.1	4.1
B24	2.5	2.5	2.7	2.7	2.9	4.0	4.7	4.2	3.2	2.6	2.4	2.2	2.3	3.5	3.6	3.1	3.8

表 2 流场校正结果表

Tab. 2 Wind flow field correction result table

风机编号	SCADA平均风速/ (m/s)	初始模型外推风速/ (m/s)	校正模型外推风速/ (m/s)	初始模型外推风速 误差 (%)	校正模型外推风速 误差 (%)	绝对误差校正值 (%)
A1	6.4	6.23	6.34	-2.66	-0.94	1.72
A2	6.076	6.47	6.03	6.48	-0.76	5.73
A3	6.152	5.98	5.93	-2.80	-3.61	0.81
A4	6.706	6.67	6.46	-0.54	-3.67	3.13
A5	6.205	5.88	6.02	-5.24	-2.98	2.26
A6	6.46	6.11	6.38	-5.42	-1.24	4.18
A7	6.21	5.58	6.22	-10.14	0.16	9.98
A8	4.912	6.05	5.19	23.17	5.66	17.51
A9	4.86	5.98	5.26	23.05	8.23	14.81
A10	5.162	6.13	5.33	18.75	3.25	15.50
A11	5.45	6.41	5.7	17.61	4.59	13.03
A12	5.53	6.23	5.72	12.66	3.44	9.22
A13	6.504	6.2	6.35	-4.67	-2.37	2.31
A14	5.707	5.88	5.66	3.03	-0.82	2.21
A15	6.372	6.49	6.28	1.85	-1.44	0.41
A16	5.74	6.38	5.82	11.15	1.39	9.76
A17	5.799	5.68	5.74	-2.05	-1.02	1.03
A18	5.951	5.96	5.92	0.15	-0.52	0.37
A19	5.9	5.54	5.9	-6.10	0.00	6.10
A20	5.881	5.51	5.83	-6.31	-0.87	5.44
A21	3.963	5.28	4.26	33.23	7.49	25.74
A22	4.613	4.92	4.67	6.66	1.24	5.42
A23	4.715	4.98	4.77	5.62	1.17	4.45
A24	5.106	5.03	5.1	-1.49	-0.12	1.37
B1	5.257	5.17	5.17	-1.65	-1.65	0.00
B2	5.286	5.57	5.52	5.37	4.43	0.95
B3	4.992	5.33	5	6.77	0.16	6.61
B4	4.733	5.01	4.86	5.85	2.68	3.17
B5	4.455	5.27	4.53	18.29	1.68	16.61
B6	5.076	5.51	5.25	8.55	3.43	5.12
B7	4.899	5.24	4.88	6.96	-0.39	6.57
B8	4.838	5.48	4.96	13.27	2.52	10.75
B9	5.016	5.76	5.15	14.83	2.67	12.16
B10	5.187	6.21	5.66	19.72	9.12	10.60
B11	4.434	5.11	4.49	15.25	1.26	13.98
B12	5.516	6.28	5.58	13.85	1.16	12.69
B13	5.396	6.29	5.54	16.57	2.67	13.90
B14	5.115	5.98	5.29	16.91	3.42	13.49
B15	4.195	5.49	4.47	30.87	6.56	24.31
B16	4.388	5.64	4.67	28.53	6.43	22.11
B17	4.628	5.87	5.04	26.84	8.90	17.93
B18	5.125	6.02	5.36	17.46	4.59	12.88
B19	4.439	5.59	4.75	25.93	7.01	18.92
B20	4.689	5.56	4.87	18.58	3.86	14.72
B21	4.7	5.59	4.9	18.94	4.26	14.68
B22	4.052	5.49	4.64	35.49	14.51	20.98
B24	3.836	5.18	4.33	35.04	12.88	22.16

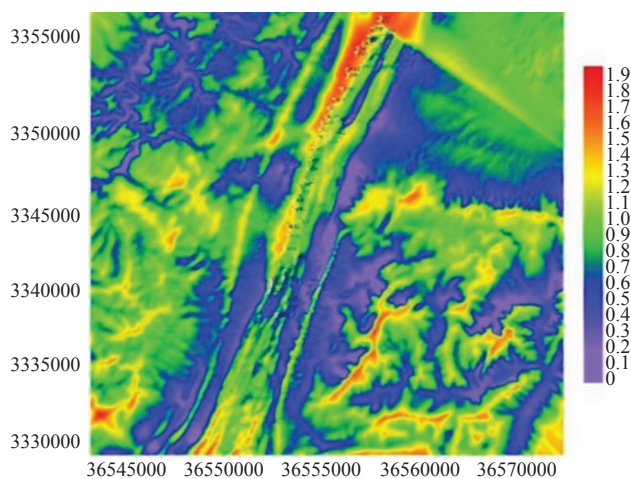


图4 135°方向风加速因子图谱(高度80 m, 校正后)

Fig. 4 Wind acceleration factor map at 135° (height 80 m, after corrected)

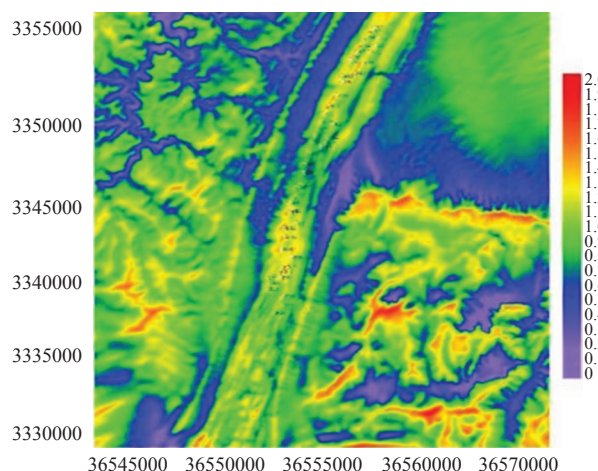


图5 157°方向风加速因子图谱(高度80 m, 未校正)

Fig. 5 Wind acceleration factor map at 157° (height 80 m, uncorrected)

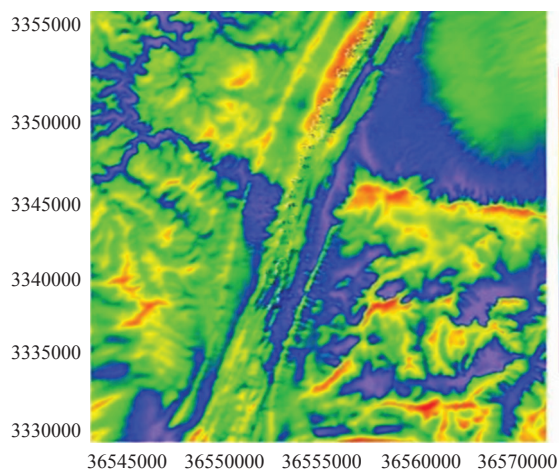


图6 157°方向风加速因子图谱(高度80 m, 校正后)

Fig. 6 Wind acceleration factor map at 157° (height 80 m, after corrected)

给出了流场校正前后的风速外推结果和风速外推误差结果。从全局来看,校正后的模型各点位处的模拟计算平均风速更加接近实际运行记录真实值。

定义模拟计算误差为

$$e_{\text{CFD}} = \frac{V_{\text{CFD}} - V_{\text{SCADA}}}{V_{\text{SCADA}}} \quad (4)$$

式中, e_{CFD} 为不同CFD模型模拟计算误差; V_{SCADA} 为点位处SCADA记录的实际风速; V_{CFD} 为通过软件模型计算得到的相应点位处的模拟风速。

从表2可以看出,各点位处的误差均有所减小,本项目经流场校正后各点位处模拟计算的绝对误差整体减少了9.74%,效果显著,该项目的流场校正效果较为良好。

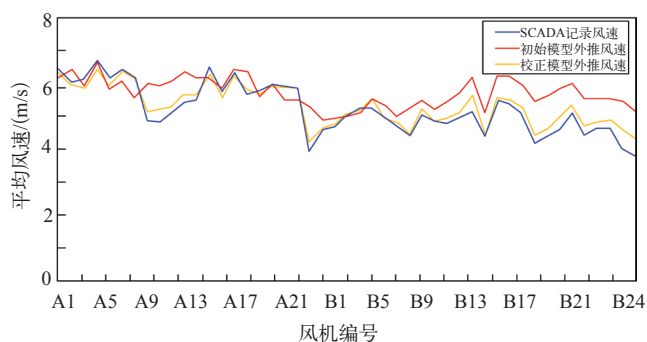


图7 流场校正前后外推风速对比

Fig. 7 Comparison of extrapolated wind speed before and after flow field correction

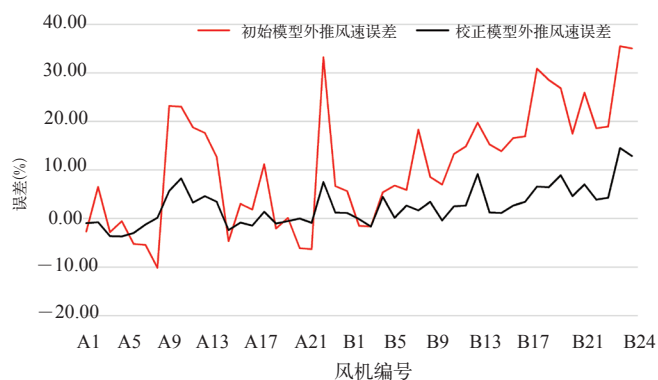


图8 流场校正前后外推风速误差对比

Fig. 8 Comparison of extrapolated wind speed error before and after flow field correction

3 结束语

风电场范围内各个点位的风机实际运行

SCADA数据可作为场区内多个离散点的真实风流特征参数,风机运行数据为风流场模拟分析提供了一种新的输入数据依据,在校正过程中通过插值的方法可使得区域流场连续平滑。

通过提出的流场校正方法,可以逐扇区地进行区域模拟结果的校正,使数值模拟结果贴近现场实际。通过实际风电场项目运行数据进行验证,表明校正后区域各风机点位处整体模拟绝对误差减小9.74%,校正效果显著。所提出的流场校正方法能够提高复杂地形的风资源评估准确度,可应用于有实际风电机组运行数据的项目技改、项目扩容、项目后评估及周边项目建设等场景。

参考文献

- [1] 肖仪清,李朝,欧进萍,等.复杂地形风能评估的CFD方法[J].华南理工大学学报(自然科学版),2009,37(9):30-35.
- [2] 王洋,周向阳.基于Scada数据的风电场改扩建数值模拟研究[J].南方能源建设,2017,4(3):92-96.
- [3] 高峰,杨锡运,王伟,等.基于测风塔测风数据的风电机组机舱风速修正[J].系统仿真学报,2016,28(11):2790-2797.

- [4] 卢胜,吴莎.基于SCADA数据的风电场后评估方法[J].电子测试,2016(1):41-43.
- [5] 杨超,王志,叶小广,等.基于SCADA数据的风电机组技术改造后评估方法研究[J].华电技术,2017,39(1):21-23,77.
- [6] 魏奇科,李正良,孙毅.山地风加速效应的计算模型[J].华南理工大学学报(自然科学版),2010,38(11):54-58,73.
- [7] 迟继峰,钟天宇,刘庆超,等.复杂地形多测风塔综合地貌及风切变拟合修正的风资源评估方法研究[J].华电技术,2012,34(11):75-77,81.
- [8] 袁万,彭秀芳.复杂地形下风资源软件Meteodyn WT的网格划分优化研究[J].太阳能学报,2016,37(12):3199-3206.

作者简介



吴莎

吴莎(1988—),男,硕士,工程师,主要研究方向为新能源发电系统。

(收稿日期:2019-10-31) **EA**