

陆上风电场折减系数及其后评估分析

许梦莹, 徐旭

上海电气风电集团股份有限公司, 上海 201100

摘要 : 风电场的发电量评估是风电项目建设前的关键环节, 决定项目的经济可行性。影响风电场年发电量的因素较多, 并以折减系数的形式参与到评估中, 本文选取实际风电场运行数据开展折减系数后评估分析, 探讨了微观选址阶段折减系数评估的准确性。后评估结果显示, 常用的微观选址软件 WT 和 WindSim 在发电量预估方面表现相近, 实际折减系数随着地形复杂度的增加而增大, 而前期发电量评估中对复杂地形下的折减系数存在低估。本文的研究为风电场的精准评估和优化设计提供了参考。

关键词 : 陆上风电场; 微观选址; 折减系数; 后评估

Reduction Factor and Its Post-Evaluation for Onshore Wind Farms

Xu Mengying, Xu Xu

Shanghai Electric Wind Power Group Co., Ltd. Shanghai 201100

Abstract : The assessment of wind power generation is a key process before the construction of wind power projects, which determines the economic feasibility of the project. By introducing the influencing factors of annual wind power generation, the composition of reduction factor and its post-assessment based on actual wind farm operation data, this paper discusses accuracy of reduction factor assessment during the wind resource assessment. The results of post-assessment show that the commonly used wind resource assessment software WT and WindSim have similar performance in the prediction of power generation. The actual reduction factor increases with the increase of terrain complexity. The reduction coefficient under complex terrain is underestimated in the early assessment. This study provides a reference for the accurate assessment and optimal design of wind farms.

Keywords : wind farm; wind resource assessment; reduction factor; post-evaluation

引言

中国风电市场起步于陆上, 经过近二十年的发展, 从高速平地到低速山区, 再到分散式, 风电行业在发展中积累了大量的数据与经验。风电场建设前会开展一系列的场址分析工作, 其中很重要的内容是决定风电场收益的风电场年发电量评估。根据我国正式颁布的关于风电场工程上网电量预测估算的规范文件^[1], 电量计算的基本逻辑是采用代表年风数据和机组功率曲线, 得到理论上网电量, 然后考虑计算过程中的影响因素, 以折减系数的形式乘以理论发电量, 从而得到预估的年发电量。

折减系数的确定方法通常以经验法为主, 基于历史数据和专家经验来设定一个大致的折减系数范围。技术发展过程中, 众多学者对折减系数取值差异化和精细化进行了研究。杨靖文等基于已运行风电场数据, 推荐折减系数各细项的取值^[2]。方卫民等采用层次分析法, 精细化至各机位点的折减系数取值^[3]。余文博收集了全国22个运行风电场的57个有效样本点的折减数据, 从整体上分析了折减系数的区间、中位数等统计特征^[4], 但并未讨论不同因素对折减系数取值的影响, 比如机型、地形复杂度等。

本文收集了12个有效的运行风电场数据, 研究了两种常用微观选址软件的发电量预估性能、机型与地形复杂度等与折减系数的联系。

一、年发电量及其影响因素

理论发电量的计算公式如下所示, 其中将风速通常按1m/s的间隔进行分组, 假定一年有8760小时:

$$\text{理论发电量} = 8760 \sum f_i P_i k \text{ kWh}$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \frac{\pi D^2}{4} V^3 C_p$$

式中:

f_i : 风速区间*i*对应的累计频率, 由处理后的测风数据得到

P_i : 风速区间*i*对应的功率, 由整机厂提供功率曲线

ρ : 空气密度

D: 叶片直径

V: 年平均风速, 由处理后的测风数据得到

C_p : 风能利用系数

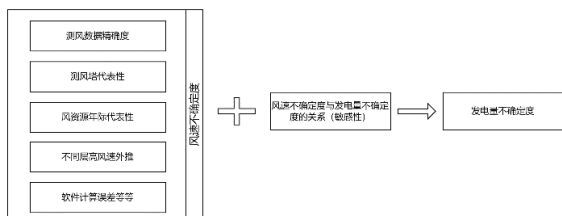
作者简介: 许梦莹(1989.8), 女, 汉族, 四川人, 硕士学历, 主要从事风能资源技术研究工作, 包括数字化风电场设计、风能资源评估等, 涉猎风电机组设计相关专业领域。

表 2 折减系数细化项

序号	项目（逐项折减项目）
1	附加尾流
2	叶片污染性能损失 ^a
3	叶片前缘侵蚀损失 ^a
4	叶片结冰性能损失 ^a
5	高速迟滞
6	线损
7	控制迟滞
8	周围已有风场影响
9	周围待建风场影响
10	环境因素（噪声、光影等）限功率运行
11	场用电
12	场平
13	限电
14	风机计划停机 ^b
15	风机故障维修 ^b
16	风机冰冻停机 ^b
17	极端温度控制 ^b
18	台风 ^b
19	遭雷劈 ^b
20	场址可入住性 ^b
21	第三方权威机构停机 ^b
22	电网掉电 ^b
23	馈线故障 ^b
24	变电站故障 ^b
25	业主原因停机 ^b

表 3 折减系数细化项 - 续

序号（续）	项目（概率分析项目）
26	周围环境变化
27	测风数据精确度
28	风场运维水平
29	风资源年际代表性
30	功率曲线保证率 ^c



> 图 2 基于概率的总体折减估算流程图

三、总体折减系数后评估

运行风场分析评估是对前期设计方案的验证与经验总结，通常也称为后评估。后评估的方法较多，主要是基于现代系统工程与反馈控制的管理理论，应用较多的有对比分析法、逻辑框架法、统计预测法、效益分析法等，其中对比分析法因其简单易理解而最为常用。本文主要以对比分析法实现对设计阶段与运行阶段折减系数指标的评估。

设计阶段的折减系数计算如上所述运行阶段折减系数的计算公式为1减去实际发电量与软件计算所得的理论发电量的比值（ $1 - (\text{实际发电量}^*) / (\text{Metedyn WT} / \text{WindSim 计算发电量})$ ），考虑到国内常用的微观选址软件主要有 Metedyn WT 和 WindSim，本文同时考虑了两款软件对风电场发电量预估的准确度比较。前期微观选址主要考虑风电场在全生命周期中平均的年发电量，因此在运行阶段后评估中也考虑了年际风速变化对折减系数的影响。

后评估需收集的资料包括前期微观选址资料、机组 1 个完整年以上运行数据、数据说明文档、风电场及机组资料、其他资料等。其他资料包括中尺度数据（MERRA2或其他）、周边气象站数据、同期风功率预测塔数据、激光雷达数据、各机位点的实际空气密度、主控风速修正方法及样机 NTF 函数等。对风电场各项资源掌握的越全面，越能避免出现基于错误假设的结论。

在数据收集过程中，因前期微观选址资料缺失、完整年运行数据无法获取或完整率较低、现场数据与微观选址数据不一致等原因，最终可供分析的项目为 12 个，其中两个项目 WT 结果缺失。

图 3 为 12 个项目前后折减系数的比较，实际折减在 7.3%~44.5% 范围内，WT 的平均折减为 24.9%，WindSim 为 23.4%。从平均值的角度，与前期微观选址设定的平均折减 23.8% 较为接近。所有项目高于前期微观选址设定折减的项目总计 6 个，低于前期微观选址设定折减的项目总计 6 个，其中使用机型 C 的 4 个项目的实际折减低于前期（实际发电量高于前期设计评估），而高于前期折减的项目即使是大风年，也并未如预期出现实际折减低于预期的情况。

图 4 为根据微观选址报告中的风场地形定义统计的不同地形下前后折减系数比较，从图中可以看出，尽管风资源工程师在工作中通常会遵循着复杂地形的折减系数会大于平坦地形的原则（个别情况除外，比如大规模风电场下场内尾流损失较大或已建风电场尾流损失大等），这与实际折减系数基本吻合。但从统计结果可以看到，前期折减评估中折减系数设定随着地形复杂度的增加而略有减小。

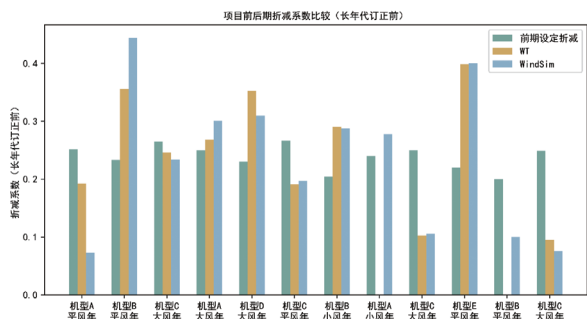
图 3 与图 4 中未考虑运行年是否是大风年，根据场址近 15 年中尺度平均风速，采用比例法对运行年的风速进行长年代订正，从结果上，长年代订正后上述分析结论基本不变，同时也额外反应出平坦地形下前期折减系数估计值与后期基本接近，而复杂地形下前期折减系数存在低估的情况。

总体上，WT 和 WindSim 两者对风电场发电量的预估差异小于各自与实际发电量的差异，不存在一款软件普遍高估或低估的情况。

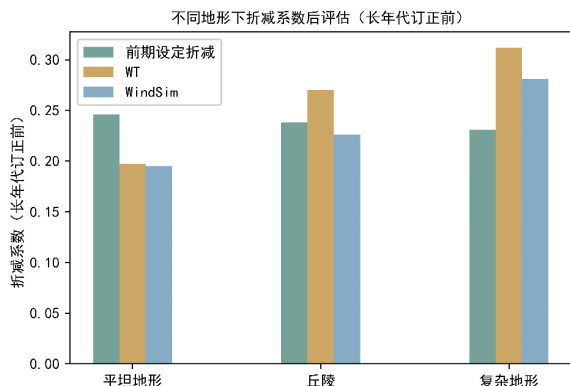
表 4 后评估项目结果汇总

项目	地形	机型	运行年大小风年	前期设定折减	长年代订正前		长年代订正后	
					WT	Wind Sim	WT	Wind Sim
1	平坦地形	机型 C	平风年	0.266	0.191	0.197	0.193	0.199
2	平坦地形	机型 C	大风年	0.25	0.103	0.106	0.153	0.156

项目	地形	机型	运行年大小风年	前期设定折减	长年代订正前		长年代订正后	
					WT	Wind Sim	WT	Wind Sim
3	平坦地形	机型E	平风年	0.22	0.399	0.400	0.411	0.413
4	平坦地形	机型C	大风年	0.249	0.095	0.076	0.177	0.159
平均值				0.246	0.197	0.195	0.234	0.233
5	丘陵	机型A	平风年	0.252	0.192	0.073	0.222	0.106
6	丘陵	机型C	大风年	0.265	0.246	0.234	0.320	0.309
7	丘陵	机型D	大风年	0.23	0.353	0.310	0.407	0.368
8	丘陵	机型B	小风年	0.204	0.290	0.288	0.231	0.229
平均值				0.238	0.270	0.226	0.295	0.224
9	复杂地形	机型B	平风年	0.233	0.356	0.445	0.342	0.432
10	复杂地形	机型A	大风年	0.25	0.268	0.301	0.458	0.482
11	复杂地形	机型A	小风年	0.24	-	0.278		0.218
12	复杂地形	机型B	平风年	0.2	-	0.100		0.059
平均值				0.231	0.312	0.281	0.40	0.30
总体平均值				0.238	0.249	0.234	0.291	0.261



> 图3 项目前期折减系数比较（长年代订正前）



> 图4 不同地形下折减系数后评估（长年代订正前）

四、分析与总结

造成风电场发电量损失的因素很多，在行业从粗放型发展到精细化的过程中，各家主体在探索更为准确的折减系数估算方式。折减系数的估算涉及到对各细项的研究分析、多个风电场数据的收集与统计分析，与各家数据管理水平、研发资源投入等密切相关。

从后评估的结果可以看到，WT和WindSim的实际折减平均值相近，与前期微观选址设定的平均值相近。两款软件对风电场发电量的预估差异小于各自与实际发电量的差异，性能持平。针对各具体项目，前期折减系数设定值与实际折减系数存在较大的差异，使用机型C的3/4项目在去除大风年的因素后，实际发电量也高于前期评估结果。而其他项目即便是大风年，实际发电量也低于预期。风电场建设中对于机型的选择，包括容量、可靠度等，是决定项目经济性的重要环节。

在地形与折减系数关系的分析中可以看到，实际折减系数随着地形复杂度的增加而增大，这与风资源工程师前期评估遵循的原则所一致。而机型C所涉及的项目中3个为平坦地形，平坦地形风况相对简单，风机故障率相对较低、运维可达性较好等是其实际发电量较高的原因。对于复杂地形下折减系数的设定，后评估结果提示前期折减系数存在低估。值得注意的是对于地形的定义，通常来源于风资源工程师根据风场地形、高程等信息主观定义，该定义可能并不能代表风资源情况，后续可考虑采用与风资源更为相关的参数量化值来进行分类。

在风电场设计阶段如何更准确的估计风电场发电量仍是一个待进一步研究的课题，需要发电量评估过程中各模型准确度的提升与技术进步、已运行机组数据的统计分析等。在精细化过程中，降低风电场运营的经济风险。

参考文献

- [1] 杨建设. 关于风电场工程上网电量估算问题的讨论 [J]. 风能, 2010 (5).
- [2] 杨靖文, 张双益. 风电场发电量折减精细化评估研究 [J]. 水电与新能源, 2019, 33(10):69-73.
- [3] 方卫民, 吴志旺. 复杂地形风电场发电量计算改进方法研究 [J]. 江西电力, 2024, 48(01):84-88.
- [4] 余文博. “平价时代”下风电项目发电量折减问题的研究 [J]. 中国新技术新产品, 2022(06):78-80.
- [5] 李慧新, 刘超, 巫发明, 等. 风电场年发电量预评估影响因素分析 [J]. 中国农机工业协会风能设备分会-风能产业, 2014.
- [6] 中国国家发展和改革委员会. “风电场过程可行性研究报告编制办法.” 发改能源【2005】899号, 2005.
- [7] 中国国家发展和改革委员会. “关于对中国风电发电量折减问题的说明.” 2009年6月.
- [8] Spruce C J. Power performance of active stall wind turbines with blade contamination [C] //Proceedings of the European Wind Energy Conference. 2006.
- [9] Langel C M, Chow R, Hurley O F, et al. Analysis of the impact of leading edge surface degradation on wind turbine performance [C] //33rd Wind Energy Symposium. 2015: 0489.
- [10] 可再生能源专家技术委员会. 基于概率的发电量计算方法指导文件: REETC/TN006:2022 [P]. 北京: 可再生能源专家技术委员会, 2022-03-15.