

热稳定性对近海风电场影响研究

彭秀芳¹, 王 磊¹, 项 雯¹, 薛飞飞², 许 昌²

(1. 江苏省电力设计院, 南京 211102; 2. 江苏南京河海大学能源与电气学院, 南京 211100)

摘 要: 通过某近海风电场热稳定性研究, 比较得出适合近海风电场的热稳定性判断方法, 并研究不同热稳定性下风电机组输出功率特性, 分析粗糙度和热稳定性对风电场影响关系, 修正 Jensen 模型, 给出不同热稳定性下合适的尾流损耗系数。结果显示: 热稳定性随时间变化, 对海上风电场风能影响较大, 不同热稳定性条件下风力发电机组输出功率变化规律不同, 修正后的尾流模型计算结果与实际值接近。

关键词: 近海风电场; 粗糙度; 尾流; 输出功率; 热稳定性; 梯度理查森法

中图分类号: TK89

文献标识码: A

0 引 言

随着风能资源的深入开发, 风电场建设逐渐转入复杂地形以及海上^[1]。东部沿海地区风能资源丰富, 与内陆风场相比, 海上风速高、受环境制约小、接近用电负荷中心、并网条件好、易于规模化发展, 因此海上风电发展前景广阔。国家能源局制定“十三五”海上风电发展规划海上装机容量目标为 1000 万 kW^[2], 海上风电将迎来高速发展时期。中国海上风电还处于起步阶段, 海上风电开发迫切需要准确评估海上风能资源, 热稳定性对海上风电场风资源有重要影响, 而海上风电场研究中大气往往被假定为中性, 未考虑热稳定性的影响。对于平均风速较低 (<6 m/s) 的风电场, 热效应对大气的影响开始变得非常显著^[3]。国外对海上风电场的研究较早, 国内海上风电起步晚, 对海上风电场空气动力学研究较少, 基本集中在中尺度风资源数值模拟以及三维海陆风研究等, 还尚未针对大气热稳定性对海上风电场的影响进行深入研究。

在国外, Giacomo^[4]对风电机组尾流进行了风洞测试, 发现尾流在对流条件下比中性条件恢复得更快。Alfredo 等^[5]从不同热稳定性条件分析 Horns Rev 项目风场一排东西方向风电机组的输出功率分析得出稳定条件下功率损失比不稳定条件高, 与改进的 Park 尾流模型模拟结果吻合。Andrea^[6]将

Monin-Obukhov 相似性理论应用到风速数据分析上, 考察海水表面、气温、离岸距离、参考风速等因素对风轮廓线的影响。Blackadar^[7]和 Lettau^[8]分别提出了中性状态下可延伸至整个边界层高度的风切变模型。Peña 等^[9]应用 Rossby 数相似理论^[10], 将模型拓展到所有热稳定性状态下。Gryning 等^[11]应用 Rossby 数相似理论, 建立了考虑热稳定性影响且适用整个大气边界层高度的新型风轮廓模型。Nikola 等^[12]用运行数据研究热稳定性对风电场出力影响, 分析得出热稳定性对轮毂高度处的风速评估影响较大, 不稳定情况下比稳定情况下风切变指数小。Sonia 等^[13]研究运行数据发现: 热稳定性、风切变、湍流等因素都会影响风电机组实际输出功率, 风速相同时稳定状态输出功率明显大于不稳定状态。在国内, 何仲阳等^[14]基于 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 对多个地形、不同风速、温差进行模拟, 结果表明: 平坦地形、低风速情况下地表温度对流场影响较大; 而在复杂地形、风速较高的情况下, 地表温度对流场影响较小。张双益等^[15]通过分析测风塔垂直方向温差对风电场功率预测系统预测精度的影响, 提出提高功率预测精度的温度校正法。

风资源评估是风电场建设成败的主要因素, 不同热稳定性下风资源差异较大, 而热稳定性对海上风电场具有重要影响。本文通过江苏某近海风电场研究, 比较得出适合近海风电场热稳定性判

收稿日期: 2016-08-30

基金项目: 中丹国际科技合作专项(2014DFG62530); 南通市科技项目(BK2014028); 江苏电力设计院科技项目(20168007816)

通信作者: 彭秀芳(1984—), 女, 硕士、工程师, 主要从事风电场微观选址方面的研究。pengxiufang@jspd.com.cn

断的方法,并研究不同热稳定性下风电机组输出功率特性,通过修正不同热稳定性下的尾流损耗系数,改进 Jensen 模型,使理论计算值与实际测量值吻合。

1 热稳定性计算方法

大气热稳定性是指受温度分布状况影响大气垂直方向运动受抑制或加强的程度。热稳定性常用的计算方法有 P - T 方法、辐射法和风向标准差 (σ_θ) 法、 ΔT 法、 $\Delta T/U$ 、风速比法 (U_R 法) 等;当考虑到大气湍流的动力及热力特征时,还有莫宁-奥布霍夫长度法、总体理查森数方法、梯度理查森法以及轮廓法,其中轮廓方法又可分为海洋温度剖面

法、温差剖面法以及不同风速和温度剖面法 3 种。国内推荐的热稳定性等级是修订帕斯奎尔分类法 (简记 $P \cdot S$),分为强不稳定、不稳定、弱不稳定、中性、较稳定和稳定 6 级,分别表示为 A、B、C、D、E、F (国外有划分 G 类热稳定性,可归入 F 类)。其中,理查森数 Ri 分类见表 1,计算公式为:

$$Ri = \frac{g \times z}{T_{10}} \times \frac{\Delta T}{\Delta u^2} \times \ln \frac{z_2}{z_1} \tag{1}$$

$$z = \sqrt{z_1 \times z_2} \tag{2}$$

式中, g ——重力加速度, m/s^2 ; T_{10} ——上下 2 个气层的平均温度, $^{\circ}C$; ΔT ——上下 2 个气层的温差, $^{\circ}C$; Δu ——上下 2 个气层的速度差, m/s ; z_1 、 z_2 ——上、下 2 个气层高度, m 。

表 1 基于理查森数的分类法

Table 1 Classification based on the number of Richardson

等级	A	B	C	D	E	F	G
Ri 值	≤ -10	$(-10, -2.5]$	$(-2.5, -0.6]$	$(-0.6, 0.2]$	$(0.2, 11.0]$	$(1.0, 33.0]$	> 3.0

2 风场介绍

某近海风电场位于江苏省沿海,风电场机位与测风塔分布情况如图 1。各列机组排布方向为 22° , M_1 是一座海上测风塔, M_2 是海岸堤上的一座测风塔,两者距离 21 km。研究中风电场运行数据以及测风数据采用同一时段测量数据,数据样本时间间隔 10 min。本文研究中主要涉及到的风电机组机型为 SWT 2.37-101,塔筒高度 80 m。

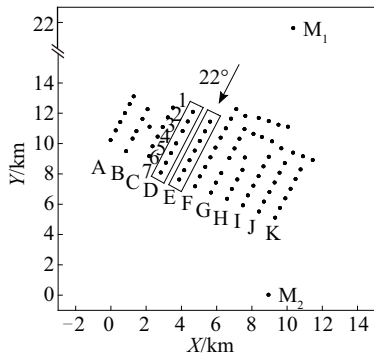


图 1 风电场机位分布示意图
Fig. 1 Distribution of wind turbines in wind farm

图 2 是陆上测风塔 M_2 和海上测风塔 M_1 同一测风时段不同高度风速对比。由图 2 可知,10、50、70 和 80 m 高度风速日变化峰值出现在 15:00,这与太阳辐射有关。15:00 是一天中太阳辐射最强的时

刻,此时陆地温度较海水温度高很多,海陆风的作用导致一天中该时刻的风速值最大。

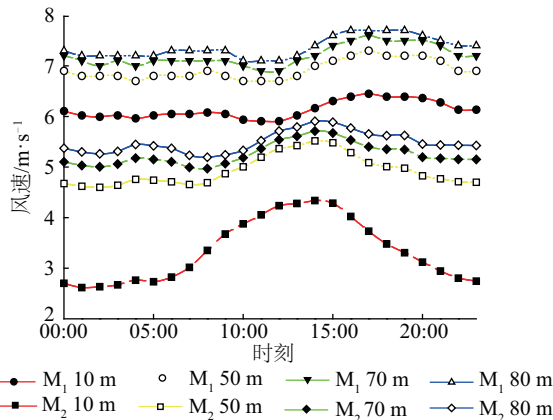


图 2 测风塔 M_1 和 M_2 不同高度风速对比
Fig. 2 Comparison of wind speed at different heights

M_1 较 M_2 风速峰值出现的时刻滞后, M_1 测风塔 10 m 高度的风速在 06:00 之后迅速增大,15:00 之后逐渐减小,与其他高度风速变化规律一致,趋势更明显,说明 06:00 之后地表温度升高,导致地表大气热稳定性降低,垂直方向上的湍流增加,因此 10 m 高度的风速迅速增大;而 M_2 测风塔 10 m 高度风速与其他高度风速变化规律、幅度一致,对比可看出海上风电场近岸区域低层风速变化受热稳定性影响较大。

3 热稳定性计算

由于海水和陆地比热容差异较大,海水温度变化较慢,海面低层大气在夜间不一定处于稳定状态,而 $P-T$ 法直接划分夜间为稳定状态,显然不适用于近海风电场热稳定性判定。

由 5 种方法计算热稳定性频率分布直方图见图 3。由图 3 知不同热稳定性判定方法对热稳定性级别判定差异较大,用 ΔT 法 A 类为 59%,明显高于其他方法; $\Delta T/U$ 方法 A 类为 19%,B 类为 35%,不稳定情况频率偏高;风向标准差法 D 类为 22%,E 类为 40%,各级别频率分布较为合理;L 法 C 类为 61%,明显高于其他方法;梯度理查森法 C 类为 37%,D 类为 31%,各级别频率分布也较为合理。可见梯度理查森法和风向标准差法能较为合理地划分热稳定性。由于风向标准差法是表征湍流强度的直接参数,能较好地划分平坦下垫面情况下的热稳定性;而理查森数综合了激发湍流的热力因子和动力因子的作用,反映了更多的湍流状况信息,能准确判定不同边界条件下热稳定性。本文采用梯度理查森数法判定热稳定性。

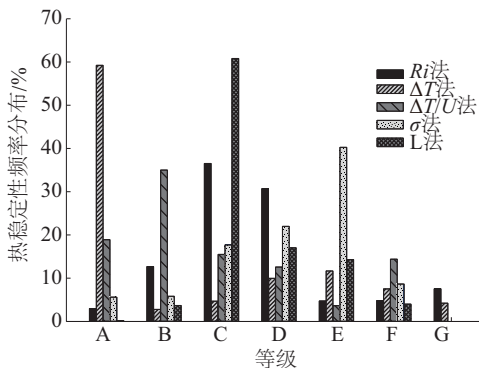


图3 不同方法计算热稳定性频率分布直方图

Fig. 3 Frequency histograms for each stability condition

为了便于研究风场热稳定性与风向之间的关系,提出热稳定性分布玫瑰图。从测风塔 M_2 各风向热稳定性频率玫瑰图(图 4)中可见各风向下热稳定性分布情况,C、D 热稳定性下各风向分布规律与风向频率分布相似。

测风塔 M_2 的理查森数日变化曲线见图 5。06:00~20:00 理查森数年平均值为负值,21:00~次日 05:00 理查森数年日变化平均值为正值。夏季理查森数日变化幅度较小,冬季理查森数日变化较大,夜晚理查森数值较高,大气层结处于非常稳定状态

下,白天理查森数值较低,大气层结处于不稳定状态,春秋两季理查森数日变化值比较接近。

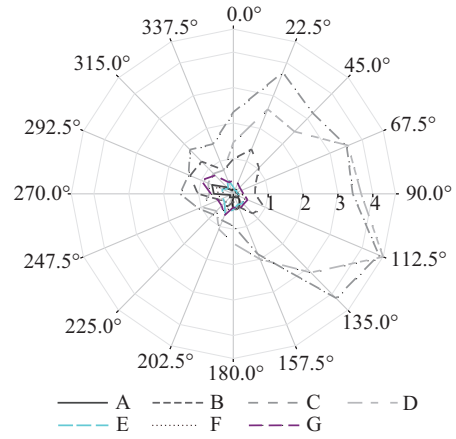


图4 热稳定性分布玫瑰图

Fig. 4 Rose diagram of atmospheric stability

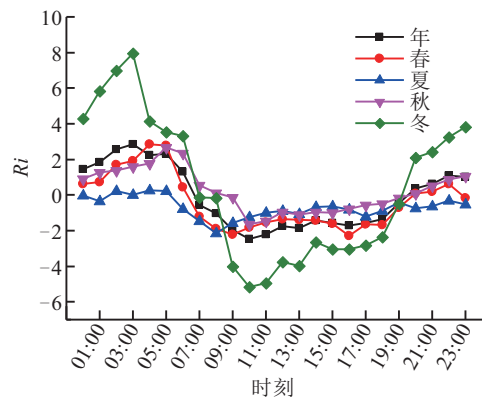


图5 理查森数日变化曲线

Fig. 5 Daily variation curve of Richardson number

4 热稳定性对风场输出功率影响研究

4.1 热稳定性与输出功率

图 1 中,风场海水深度由西南向东北逐渐增加,D 和 E 列机组中间从第 5 号机组开始向东北方向存在一条 202° 方位的深水带,比两侧水深,常年处于水下,所以 22.5° 风向下 D/E 列机组来流的下垫面相似,海面粗糙度相近; 7.5° 风向下 D/E 列机组来流的下垫面不同,D 列来流下垫面粗糙度明显大于 E 列,可用于研究不同粗糙度和热稳定性对风电机组输出功率的影响。研究中将热稳定性分为 4 类:稳定对应热稳定性级别 E、F;中性对应级别 D;不稳定对应级别 C;极不稳定对应热稳定性级别 A、

B。E1 和测风塔 M₁ 同时满足风速范围 4~11 m/s, 在这个范围内风电机组的推力系数变化较小, 风向范围为 $(7.5 \pm 7.5)^\circ$ 和 $(22.5 \pm 7.5)^\circ$, 4 种热稳定性下 10 min 风数据样本数据量见图 6。

图 7 是 2 列机组在 4 类热稳定性下轮毂高度

处的风速和输出功率衰减特性曲线, U_{free} 是某列不受尾流影响的第一台机组轮毂高度处的风速, U_i 是某列第 i 号机组的轮毂高度处的风速; P_{free} 是某列不受尾流影响的第一台机组输出功率, P_i 是某列第 i 号机组的输出功率。

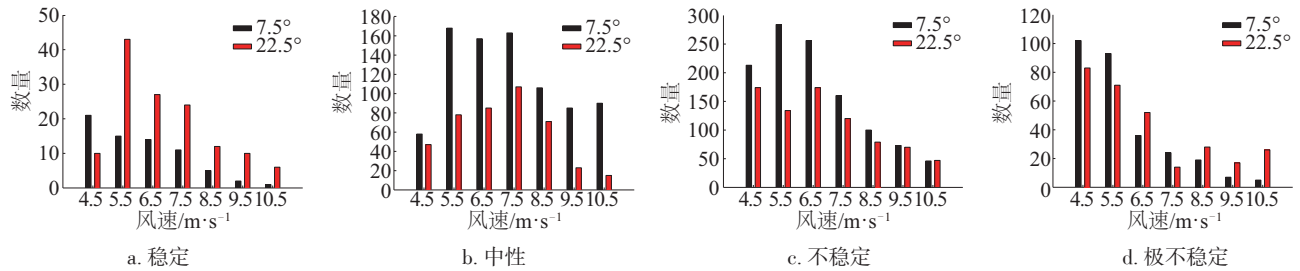
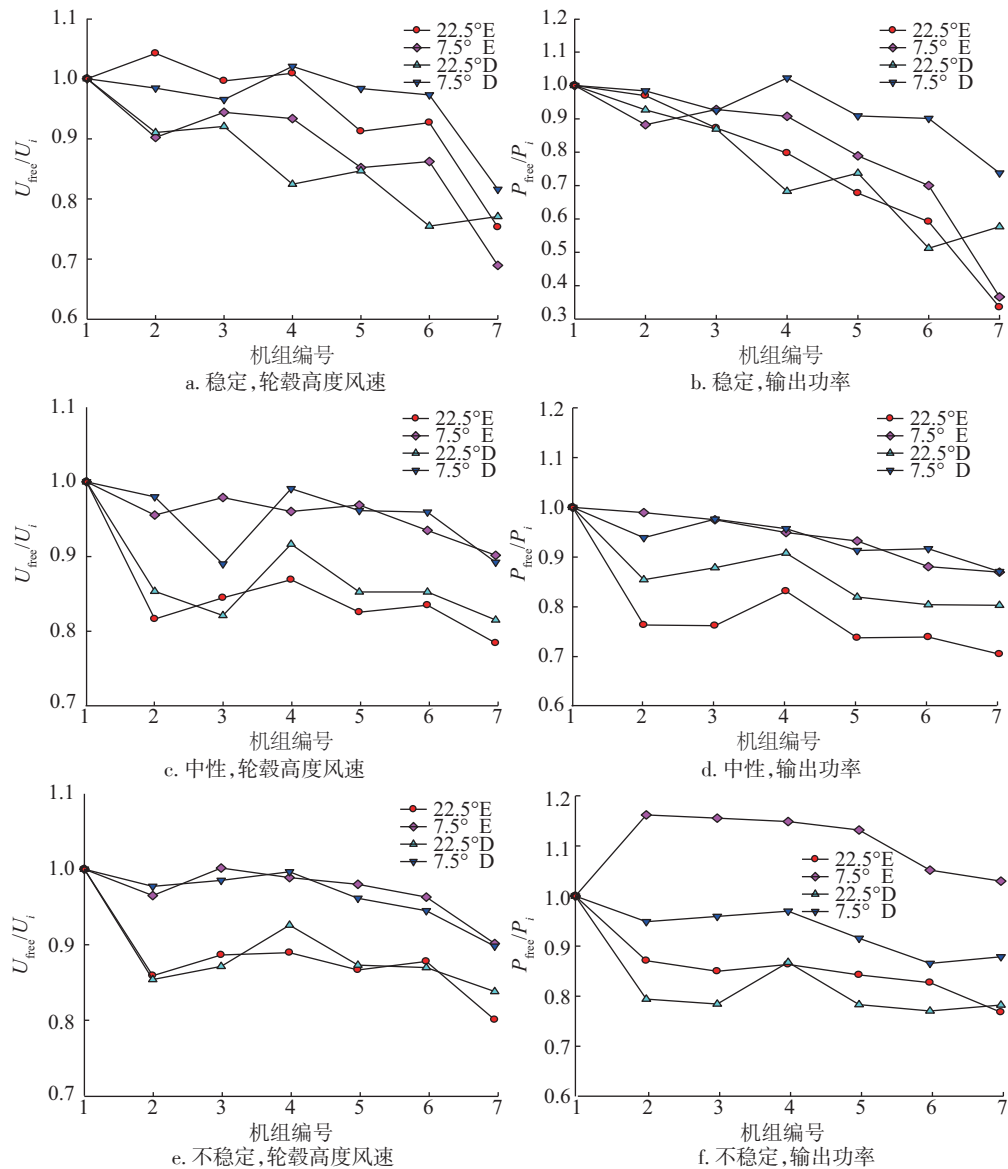


图 6 4 种热稳定性下 10 min 风数据样本

Fig. 6 Wind speed histograms for four stability conditions



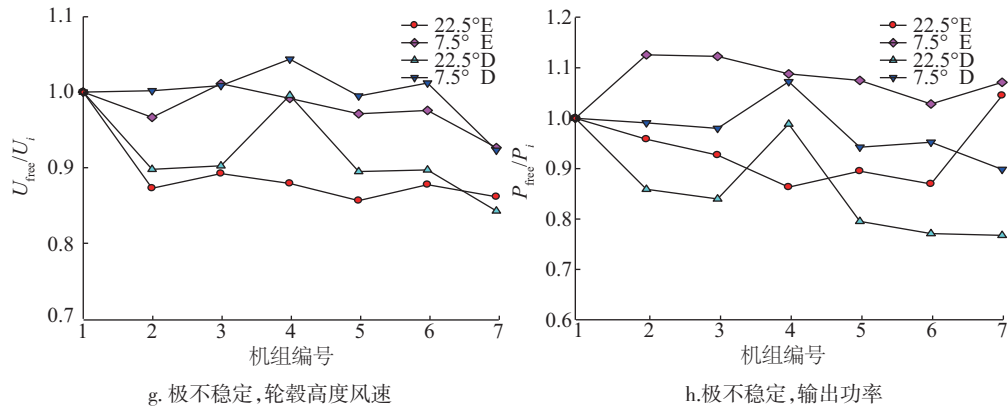


图 7 D/E 列机组轮毂高度风速和输出功率衰减特性曲线

Fig. 7 Characteristic attenuation curve of wind speed and power in D/E series

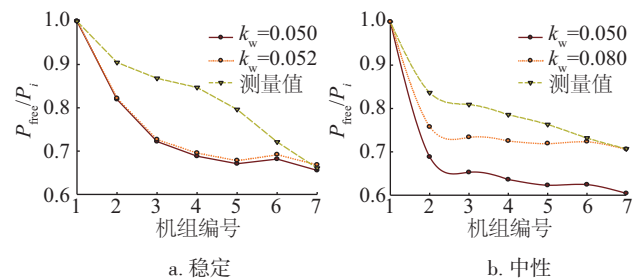
对比图 7 中 4 种状态下输出功率变化曲线可知,稳定状态下同列机组输出功率较不稳定状态下功率衰减快,因此稳定状态下尾流耗散较快;7.5°风向角下由于机位排布方向影响,2 列机组前 1~5 号机组来流风速受前排机组影响较小,可认为是自由流,所以各热稳定状态下机组轮毂高度处的风速比较接近,但各机组发电量差异较大,因为热稳定性影响了来流的风轮廓,不同的风切变导致机组发电量的差异。22.5°风向角 4 种热稳定性中,D/E 列各对应编号机组归一化功率相差约 5%,稳定状态下两列对应编号机组功率较接近,中性条件下 D 列机组比 E 列机组归一化功率略高,不稳定和极不稳定条件下 E 列机组比 D 列机组归一化功率略高,这是由于 2 列机组行间距有差异,且 D/E 列机组沿来流方向上游水深不完全相同,粗糙度有差异。

7.5°风向角 4 种热稳定性中,D/E 列各对应编号机组归一化功率差异较大,稳定条件下 D 列机组比 E 列机组归一化功率高,中性条件下 2 列对应编号机组功率比较接近,不稳定条件下 E 列机组比 D 列机组归一化功率高 20%,极不稳定条件下 E 列机组比 D 列机组归一化功率高 10%,因为不同稳定条件下风切变不同,在粗糙度和热稳定性共同作用下导致发电量的差异。D/E 2 列机组对应编号风速相近,同列机组中风速变化较小,所以 D 列机组前 5 个机组功率比较接近,E 列机组在 4 种热稳定性下,来流风向上的粗糙度可认为是定值(z_0 值较小),但不同热稳定性下输出功率差异很大,稳定和中性条件下 $P_{E1}/P_{E1} < 1$,不稳定和极不稳定条件下

$P_{E1}/P_{E1} > 1$,而 D 列机组各稳定性下功率衰减规律相似,来流风向上的粗糙度可认为是定值(z_0 值较大),因此粗糙度较大时,热稳定性对风电机组输出功率影响较小,粗糙度较小时,热稳定性对风电机组输出功率影响占主导地位。

4.2 Jensen 模型修正

WAsP 中海上风电场推荐尾流损耗系数 k_w 为 0.05,陆上风场推荐值为 0.075,本文通过 Jensen 尾流模型修正尾流损耗系数 k_w ,利用风速在 4~11 m/s,风向角在 60°~350°(M_2 和 E1 同时满足)的风数据计算模拟。图 8 是 E 列机组不同热稳定性下功率模拟值与实测值对比图。由图 8 可知,E 列机组第 2 台机组相对第 1 台机组发电量迅速降低,第 2 台机组后面的机组发电量逐渐减小并趋于平缓,修正后的模拟结果与测量值更接近,可见海上风电场尾流耗散系数取决于风场热稳定性情况,适合于本风场稳定、中性、不稳定、极不稳定下的 k_w 值分别为 0.520、0.080、0.089、0.110。对不同海上风电场运用 Jensen 尾流模型修正后计算模拟,可提高海上风场计算准确度,且较好地反应近海风电场风电机组输出功率变化规律。



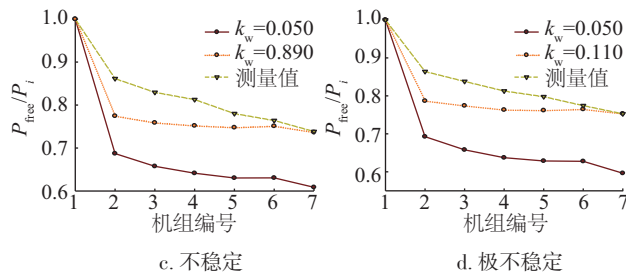


图8 模拟值与实测值对比

Fig. 8 Comparison between simulation and measurement

5 结 论

1)海上风电场近岸区域低层风速变化受热稳定性影响较大。理查森数综合了湍流激发的热力因子和动力因子的作用,反映了更多的湍流状况信息,适用于近海风电场热稳定性判定。夏季理查森数日变化幅度较小,冬季理查森数日变化较大,春秋两季理查森数日变化接近。

2)本文所述海上风电场在稳定条件下功率损耗较快,不同热稳定性对海上风电场风电机组输出功率影响较大。粗糙度较大时,热稳定性对风电机组输出功率影响相对较小,海面粗糙度较小时,热稳定性对风电机组输出功率的影响占主导地位。

3)通过 Jensen 尾流模型修正,计算模拟结果与观测值吻合,较好地反映了近海风电场风电机组输出功率变化规律,不同区域海上风电场应该根据其热稳定性分布情况修正其估算发电量。

【参考文献】

- [1] 许 昌,杨建川,韩星星,等.基于CFD和NCPSO的复杂地形风电场微观选址优化[J].太阳能学报,2015,36(12):2844—2851.
- [1] Xu Chang, Yang Jianchuan, Han Xingxing, et al. Optimization of windfarm micro-sitting in complex terrain based on CFD and NCPSO [J]. Acta Energaie Solaris Sinica, 2015, 36(12): 2844—2851.
- [2] 谢育彤.风电行业在十三五期间将进入调整期[EB/OL]. <http://www.qufair.com/news/2016/07/08/5499.shtml>, 2016-07-08.
- [2] Xie Yutong. The wind power industry will enter a period of adjustment during 13th Five-Year [EB/OL]. <http://www.qufair.com/news/2016/07/08/5499.shtml>, 2016-07-08.
- [3] Olivier Texier, Tristan Claren. Integration of atmospheric stability in wind power assessment through CFD modeling [A]. The European Wind Energy Association, Copenhagen [C], Copenhagen, 2012, 562—568.
- [4] Giacomo Valerio Iungo. Experimental characterization of wind turbine wakes: Wind tunnel tests and wind LiDAR measurements [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2016, 149: 35—39.
- [5] Alfredo Peña, Pierre-Elouan Réthoré, Ole Rathmann. Modeling large offshore wind farms under different atmospheric stability regimes with the Jensen wake model [J]. Renewable Energy, 2014, 70: 164—171.
- [6] Andrea Venora. Monin-Obukhov similarity theory applied to offshore wind data validation of models to estimate the offshore wind speed profile in the north sea [D]. Delf: Delf Univerisity of Technology, 2009.
- [7] Blackadar A K. The vertical distribution of wind and turbulent exchange in a neutral atmosphere [J]. Journal of Geophysical Research, 1962, 67(8): 3095—3102.
- [8] Lettau H H. Theoretical wind spirals in the boundary layer of a barotropic atmosphere [J]. Contributions to Atmospheric Physics, 1962, 35: 195—212.
- [9] Peña A, Gryning S E, Hasager C B. Comparing mixing-length models of the diabatic wind profile over homogeneous terrain [J]. Theoretical and Applied Climatology, 2010, 100: 325—335.
- [10] Stull R B. An Introduction to boundary layer meteorology [M]. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1988.
- [11] Gryning S E, Batchvarova E, Brümmner B, et al. On the extension of the wind profile over homogeneous terrain beyond the surface layer [J]. Boundary-Layer Meteorology, 2007, 124(2): 251—268.
- [12] Nikola Sucevic, Zeljko, Djuricic. Influence of atmospheric stability variation on uncertainties of wind farm production estimation [A]. The European Wind Energy Association [C], Copenhagen, 2012, 1023—1026.
- [13] Sonia Wharton, Julie K Lundquist. Atmospheric stability affects wind turbine power collection [J]. Enviromental Research Letters, 2012, 7(1): 45—51.
- [14] 何仲阳,宋梦譔,张 兴.地表温度对风场模拟的影响 [J]. 化工学报, 2012, 63(s1): 7—11.
- [14] He Zhongyang, Song Mengxuan, Zhang Xing. Influence of terrain surface temperature on wind farm simulation

- [J]. Ciesc Journal, 2012, 63(s1): 7—11.
- [15] 张双益, 胡 非, 王益群, 等. 大型海上风电场尾流模型及大气稳定度影响研究[J]. 风能, 2017, 8(8): 62—67.
- [15] Zhang Shuangyi, Hu Fei, Wang Yiqun, et al. Study on wake models and atmospheric stability of large offshore wind farms[J]. Wind Energy, 2017, 8(8): 62—67.

STUDY ON INFLUENCE OF ATMOSPHERIC STABILITY ON OFFSHORE WINDFARM

Peng Xiufang¹, Wang Lei¹, Xiang Wen¹, Xue Feifei², Xu Cang²

(1. Jiangsu Province Electric Power Design Institute, Nanjing 211102, China;

2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: In this paper, by means of the study of an offshore windfarm about the atmospheric stability, conclusion is drawn that Richardson gradient method is suitable for the judgment of atmospheric stability for offshore windfarm. Meanwhile, the variation of output power of wind turbine in different atmospheric stability is researched; the Jensen model is modified with appropriate wake decay coefficient in different atmospheric stabilities. The results showed that the atmospheric stability changes with time and has a great influence on the wind power of the offshore windfarm. The variation of the output power of the wind turbine is different under different atmospheric stability conditions. The calculated results of the revised wakes model are close to the actual value.

Keywords: offshore wind farms; roughness; wakes; output power; atmospheric stability; Richardson gradient method