

海上相邻风电场间的“尾流效应”实例分析

崔冬林^{1,✉}, 沙伟¹, 刘树洁^{2,3}, 陈秋阳^{2,3}, 王尼娜^{2,3}

(1. 新疆金风科技股份有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830001;

2. 浙江省深远海风电技术研究重点实验室, 浙江 杭州, 311122;

3. 中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司, 浙江 杭州, 311122)

摘要: [目的] 研究海上相邻风电场间的“尾流效应”对发电损失的影响。[方法] 利用海上风电场实际运行 SCADA 数据结合激光雷达同期实测测风数据, 基于不同的风向扇区范围和风电场实际排布进行尾流效应场景分类, 开展实际运行相邻风电场间(20D 以上间距)的真实尾流电量损失分析工作。[结果] 结果表明: 对于规则排布的海上大型风电场, 基于实际运行 SCADA 数据, 对各机组发电量进行归一化, 可以较好地反映海上风能资源分布特征及各机组发电能力的差异; 高度集中的单一扇区条件下, 处于下风向的相邻风电场受上风向相邻场区的“尾流效应”影响明显, 发电产能较自由流降幅明显; 相邻风场间随着缓冲带距离的增加, 下风向场区机组尾流电量衰减比随之降低, 缓冲带需达到一定的距离, 对于风速的恢复有明显的作用, 发电产能才能够有所提升; 本案例不同场景下, 缓冲带距离在 23D~44D 之间, 尾流损失电量降幅在 27%~4% 之间。[结论] 基于相邻风电场实际运行数据开展尾流分析可为后续海上大型风电基地规划设计和机组排布优化设计提供指导。

关键词: 相邻风电场; 尾流效应; 发电量归一化; 缓冲带; 排布优化

中图分类号: TK89; TM614

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)01-0021-08

开放科学(资源服务)二维码:



Case Study of "Wake Effect" of Adjacent Offshore Wind Farms

CUI Donglin^{1,✉}, SHA Wei¹, LIU Shujie^{2,3}, CHEN Qiuyang^{2,3}, WANG Nina^{2,3}

(1. Xinjiang Goldwind Science & Technology Co., Ltd., Urumqi 830001, Xinjiang, China;

2. Key Laboratory of Far-Shore Wind Power Technology of Zhejiang Province, Hangzhou, China, 311122;

3. PowerChina Huadong Engineering Corporation Limited, Hangzhou, China, 311122)

Abstract: [Introduction] The purpose of this paper is to study the influence of real "wake effect" of adjacent offshore wind farms on generation loss. [Method] The method is established with the wake scene classification based on the actual arrangement of wind farms under different wind direction and the real wake power loss of adjacent wind farms (with a spacing of more than 20D) in operation are analyzed, based on the actual SCADA data of wind turbines in large offshore wind farms and the measured wind data of LIDAR in the same period. [Result] The results show that: for the large-scale offshore wind farms with regular arrangement, the power generation normalization of the actual SCADA data can better reflect the distribution characteristics of offshore wind energy resources and the difference of power generation capacity; Under the condition of highly centralized wind direction, the adjacent wind farms in the downwind are obviously affected by the "wake effect" of the upwind wind farm; The buffer zones with different distances of adjacent wind farms have an obvious effect on the recovery of wind speed which affected the power generating capacity. The power generating capacity can be improved but if the buffer zone can reach enough distance; In different scenes of this case, the buffer zone distance is between 23D and 44D, and the power loss of wake decreases by 27%~4%. [Conclusion] This work can provide guidance for the planning of offshore wind power base and the optimization design of large offshore wind farms.

Key words: adjacent wind farms; wake effect; power generation normalization; buffer zone; layout optimization

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2021-10-13 修回日期: 2021-12-30

基金项目: 国家自然科学基金联合基金项目“基于数值模拟的雅砻江流域风能资源多尺度耦合评估方法研究”(U1865102)

0 引言

随着全球范围内的风电开发,中国海上风电规模已经跃居第二,而“平价”市场条件下,海上风电开发面临严峻挑战,发电量是影响风电场经济收益的重要指标之一。海上风电较陆上开发规模更大、更集中,同时不受地形干扰,风能资源分布较均匀,风电机组的布置在空间上一般呈现较为规则的几何形态^[1-2],多台、多排风机尾流相互叠加影响、风速恢复缓慢,造成尾流损失加重。目前针对海上风电场尾流模型的研究,国内外学者已做了大量的研究工作,1982年 Risø 实验室提出的 Jensen 模型是基于贝茨极限理论和质量守恒定律提出的,适用于平坦地形的尾流模型^[3];相关研究^[4]表明风机完全处于尾流区运行时,功率损失可达 30%~40%;刘沙等^[5]利用华南某海上风电场实际运行 SCADA 数据,对 Jensen/Park 模型及其参数设置进行验证,表明 Park 尾流模型能够较好地模拟近海风场尾流损失,模型参数选择需根据实际项目进行敏感性测算;温建民等^[6]使用激光雷达对陆上某风场单台风机进行尾流观测,分析不同来流风速下尾流区风速恢复速率,为风电场排布优化和发电量提升奠定基础。

如何控制和降低大型海上风电场的尾流电量损失是海上风场评估的关键问题之一,而相邻风电场区间的相互影响作用也是不可忽视的,李岩等^[7]为提升大型海上风电场经济效益,提出一种规则型排布优化策略,以提升大型海上风电场的经济效益;郑建才等^[8]研究不同尾流叠加模型对尾流场模拟精度,为大型风电场尾流叠加形式的选取提供建议;而目前大多海上风场的尾流损失评估主要是基于模型仿真结果,周边相邻风电场之间实际的相互影响与场群间“尾流效应”研究相对比较少,本文基于实际运行风电场 SCADA 数据分析相邻风电场之间的相互影响造成的真实尾流损失情况,探讨海上相邻风电场间的尾流效应与缓冲带的作用,为后续海上大型风电场项目规划和风场优化排布提供参考。

1 数据与方法

1.1 参考风电场选取

本文选取江苏某海上风电基地已运行风电场 H7 开展分析工作,该风电场离海岸线最近距离 35 km

左右,分南、北两个场区,周边已建成风电场有 H11(西北方向相距 H7 北区 4.15 km,约 32D)和 H12(正西方向相距 H7 北区 2.62 km,约 20D),具体见图 1。

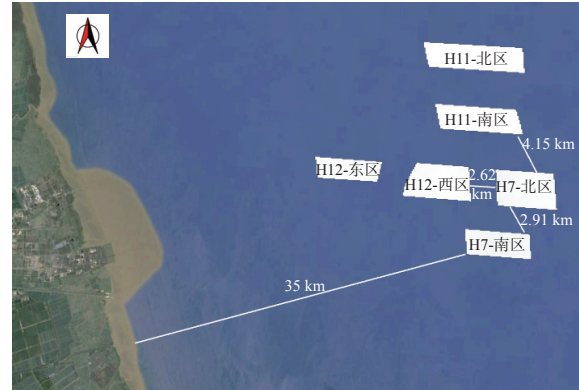


图 1 各风电场区相对位置分布示意图
Fig. 1 Relative location map of wind farms

参考 IEC 61400-12-1 标准^[9]对于自由流扇区影响扇区与距离的定义,及海上风电机组尾流影响范围等计算方法,场区间距 20D 及以上距离可视为独立风场,本文主要基于 H7 风电场北区和南区开展相邻风电场之间的尾流影响效应分析工作。

1.2 数据分类

主要数据应包括 3 类:风电场基本信息、同期测风数据和风电机组 SCADA 运行数据。具体如下:

1) 风电场基本信息

参考风电场 H7 共 80 台 WTGS130-2.5 MW 机组,轮毂高度 85 m,具体排布方案如下:北区机组 B1~B42,共 4 排 lin1~lin4,由北向南第一排 B1~B12、第四排 B31~B42,相邻机组东西向间距为 570 m(约 4.1D),第二、三排 B13~B21、B22~B30,东西向间距 680 m(5.2D),南北方向机组之间距离均为 1300 m(约 10D);南区机组 B43~B80,共三排 lin5~lin7,东西向间距 4.1D、南北向间距 10D(见图 2)。

2) 同期测风数据

在风电场升压站上部署了一台地面式激光雷达设备,处于风电场北区的西南方向,离海平面高度 31 m,距离 B31 风机约 570 m,相对位置见图 2。雷达设备型号 windcube,观测读取 10 min 平均风速、风向等参数,观测时段 2020-10-15~2021-01-15,观测高度共 12 层,离海平面高度如下:(70 m/75 m/85 m/100 m/110 m/120 m/140 m/160 m/190 m/210 m/260 m)。

3) 机组 SCADA 运行数据

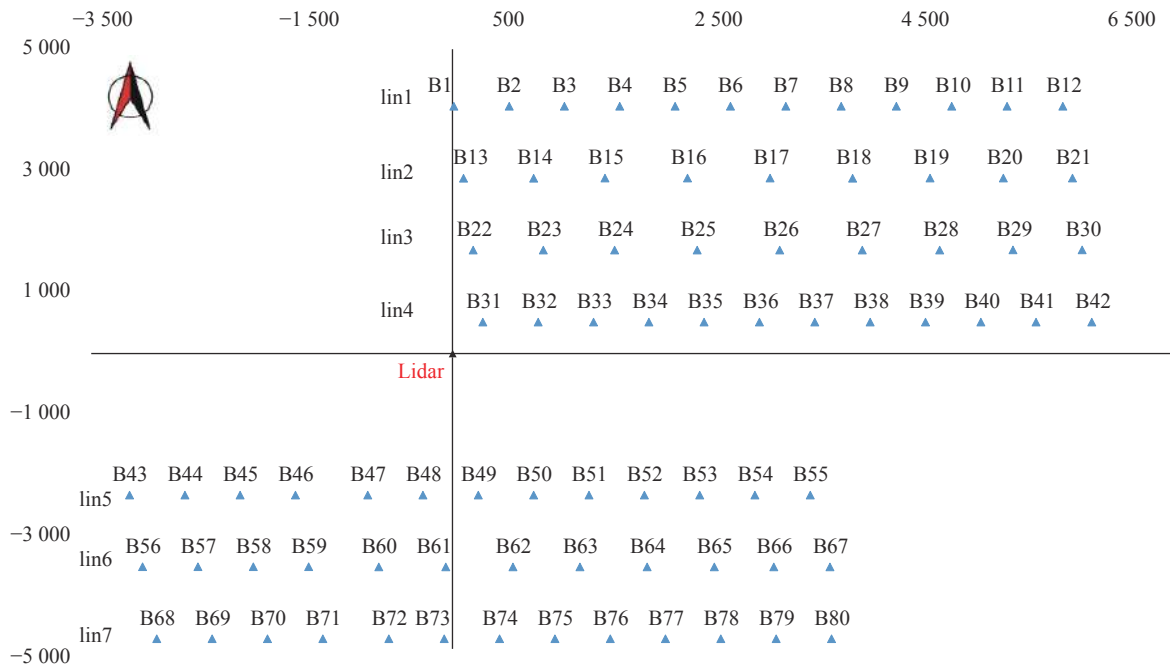


图 2 风电场风电机组排布及雷达相对位置示意图

Fig. 2 Relative location map of WTGS and radars in wind farm

采集参考风电场同期观测时段 2020-10-15 ~ 2021-01-15, 各风电机组实时监控记录的系统记录的 10 min 平均数据包括风速、网侧有功功率、发电量及其他状态信息数据等, 剔除机组故障、异常、停机、限电等异常状态数据。

1.3 分析方法

1) 参考风向选取

由于机舱测风风向为相对风向, 不能直接代表真实风向, 选取激光雷达实测风向作为参考基准。考虑激光雷达部分扇区方位离风电机组较近, 可能会受不同程度的影响, 统计对比激光雷达实测 (2020-10-15 ~ 2021-01-15) 时段不同高度处风向与主风能风向频率 (85 m/120 m/160 m/210 m/260 m), 发现分布频率基本一致差异不大 (见图 3), 故选取同期激光雷达实测轮毂高度 85 m 处风向作为基准参考风向。

2) 发电量归一化处理

基于风电场后评估经验, 机舱风速受各因素的影响不能够代表真实风况^[10-12], 部分国内外的尾流相关研究^[13-15]基于机组的实际出力来开展风电场尾流影响相关分析工作。本文选取 B12 机组作为参考基准点, 将 B12 机组正常运行状态下的实际产能定义为 P_0 , 其他机组同期正常运行状态下的输出产能为

P_r , P_r/P_0 为同期发电产能百分比, 发电量归一化可用于对比各机组同等条件下的实际产能差异, 上述机组产能是指机组正常运行状态下的产能, 剔除机组故障、停机、限电等异常状态运行数据, 为了更好地对比机组产能的差异性, 选取样本也不包括机组满发运行状态数据, 即产能差异主要源于自身风资源差异和尾流损失两个因素排除其他因素。

3) 相邻风电场尾流效应场景分类

基于相邻风电场分布及风电机组实际排布, 不同风向条件下, 下风向相邻风场受影响范围可代表不同“尾流效应”影响状态, 为保证样本量, 扇区筛选按照实际风机相对位置下的影响范围上限原则, 共分为 3 类场景, 详见表 1。

2 分析与结果

2.1 风资源自身差异性分析

1) 东西向风资源差异分析

综合考虑周边风电场分布情况, 处于自由流风况下正常运行状态下的机组, 进行发电量归一化对比, 可反映该扇区条件下风资源的分布特点。可见在 $30^\circ \sim 75^\circ$ 扇区范围内, H7 北区 lin1(B1 ~ B12) 机组, 及 $345^\circ \sim 15^\circ$ 扇区范围内, lin1(B9 ~ B12) 机组上

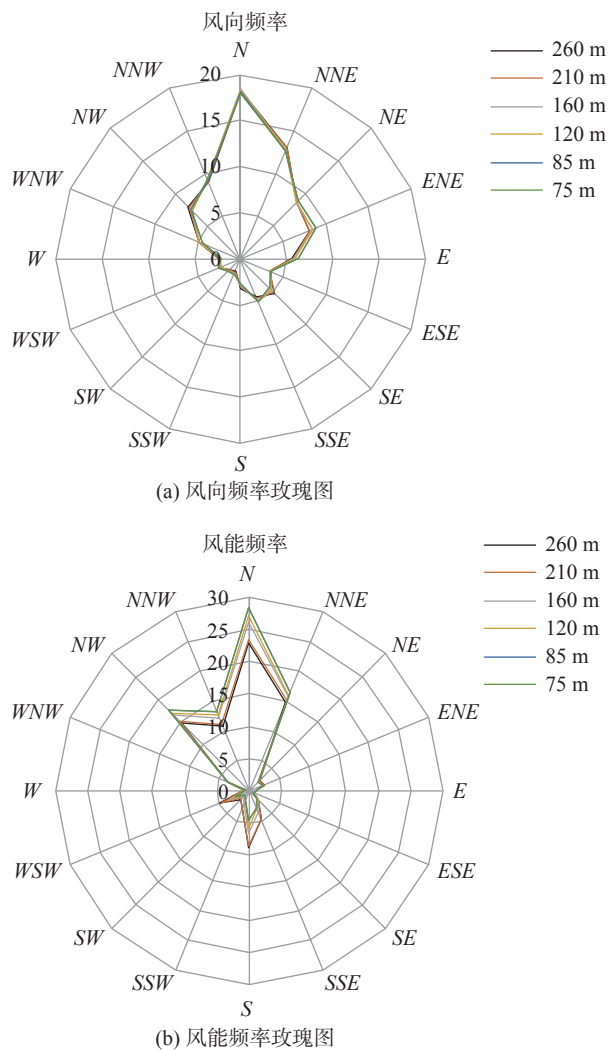


图 3 风向 (a) 和风能 (b) 玫瑰图

Fig. 3 Rose diagram of wind direction (a) and wind energy (b)

风向均无遮挡,处于自由流风况(见图 4)。

提取不同扇区区间范围进行统计分析,结果如下(见图 5): (1)30°~75°扇区范围内,由西向东方向,lin1(B1~B12)机组发电能力相当,说明该扇区范围内东、西向风资源差异不大;(2)345°~15°扇区范围

内,处于自由流的 B9~B12 机组发电能力相当, B1~B8 则受上风向风电场不同程度的影响,发电量由西向东逐渐增大。

2) 南北向风资源差异分析

选取 $E(90^\circ \pm 15^\circ)$ 、 $ENE(60^\circ \pm 15^\circ)$ 扇区范围内,处于自由流风况下的代表机组,北区 B12、B21、B30、B42 和南区 B55、B67、B80, B12 与 B80 相距约 9 km (见图 4),进行发电量归一化统计,其中 B12 机组作为参考基准点。

结果如下(见图 6):南北方向上最大距离约 9 km,各机组发电能力相当,说明 $ENE \sim E$ 扇区范围内南、北方向风资源相近,无明显差异。

2.2 尾流效应分析

基于不同的风向扇区条件和风电场机组实际排布分为 3 类尾流效应场景,开展实际运行相邻风电场的真实“尾流效应”分析工作;本文尾流电量损失比均是基于机组正常运行状态下(不包括满发状态),单一扇区条件下进行的尾流电量损失比,不能代表综合风况条件下全场平均尾流电量损失比。

场景 1: 60°~75°扇区条件下,风场北区 lin1(B1~B12)&lin4(B39~B42)和南区 lin5(B50~B55)上风向无遮挡,处于自由流风况,lin4(B31~B38)和 lin5(B43~B48)处于下风向尾流区内(见图 7),统计各机组同期正常运行状态下(不包括满发状态)的实际出力进行对比分析。

结果如下(见图 8):

1) 上风向无遮挡处于自由流风况的 lin1(B1~B12)、lin4(B38~B42)和 lin5(B50~B55)各机组发电较接近差异较小,说明该扇区条件下,东、西向风资源差异不大。

2) lin5(B43~B48)处于北区风场的下风向,较自由流机组 lin5(B50~B55)发电降低 4%~12% 之

表 1 相邻风电场尾流效应场景分类

Tab. 1 Classification of wake effect scenes of adjacent wind farms

场景	扇区筛选	上风向风场	下风向风场	缓冲带距离/km	影响范围	说明
场景1	60°~75°	H7北区	H7南区	5.64 (43.4D)	半影响	北区处于上风向,南区场区部分风机lin5(B43~B47)处于下风向
场景2	30°~45°	H7北区	H7南区	4.3 (33.3D)	全影响	北区处于上风向,南区场区所有机组均处于下风向
场景3	345°~360°	H11	H7	4.3 (33D) &4.05 (31D)	半影响	H7北区部分风机lin1(B1~B8)处于下风向 H7南区部分风机lin5(B51~B55)处于H11和H7北区的下风向
场景3	345°~360°	H12	H7南区	3.05 km(23.4D)	半影响	H7南区部分机组lin5(B43~B47)处于下风向

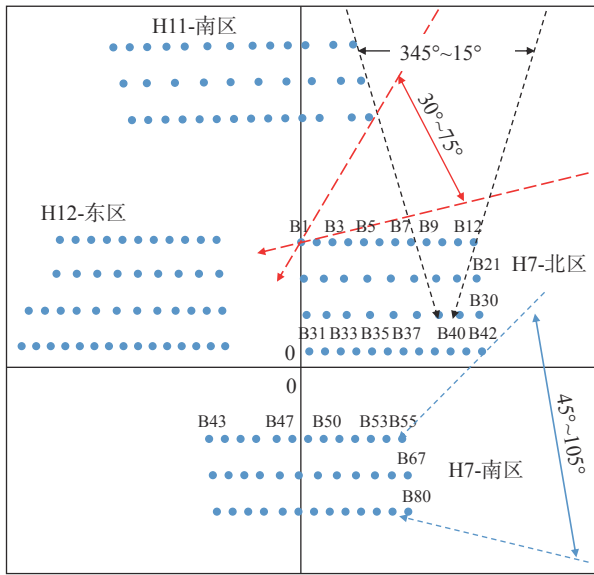


图 4 自由流扇区示意图

Fig. 4 Schematic diagram of free-flow sector

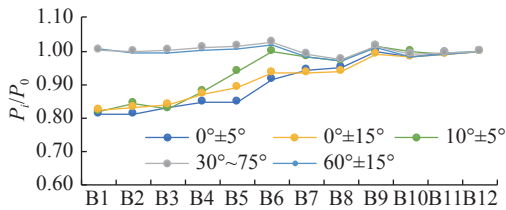


图 5 典型机组不同扇区条件下发电量归一化结果分布图

Fig. 5 Distribution diagram of power generation normalization of typical WTGS under different wind directions

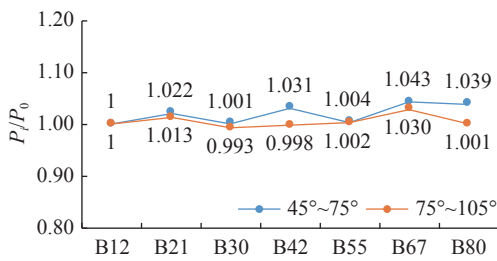


图 6 典型机组不同扇区条件下发电量归一化结果分布图

Fig. 6 Distribution diagram of power generation normalization of typical WTGS under different sector conditions

间,由西向东发电量逐渐增大,说明受上风向相邻风场不同程度的“尾流效应”影响造成电量损失差异。

3) 延尾流中心线 67.5°方向各机组叠加尾流影响: 对比 lin4(B38 ~ B42)&lin5(B44 ~ B48), 南区 lin5 离相邻场区 lin4 间隔 5.64 km(43.4D) 左右的缓冲带, lin5(B44 ~ B48) 较 lin4(B38 ~ B42) 发电量降低 5.7% ~

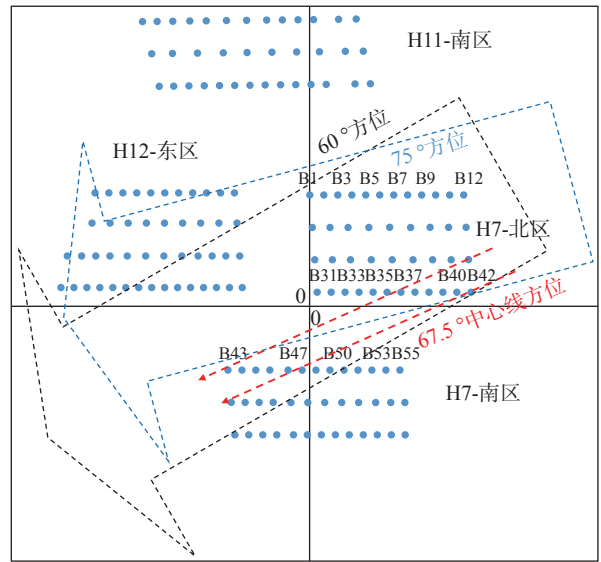


图 7 不同扇区条件下(60°~75°)的尾流效应影响场景

Fig. 7 Scenes affected by wake effect under different sector conditions (60°~75°)

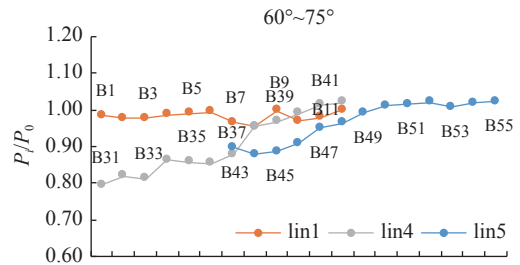


图 8 各机组 60°~75°扇区下发电量归一化统计分布图

Fig. 8 Distribution diagram of power generation normalization of WTGS under different sector conditions (60°~75°)

8.2% 之间,说明该缓冲带距离下仍受上风向相邻场区影响导致风速衰减发电降低。

场景 2: 30° ~ 45°扇区范围内,风场北区 lin1(B1 ~ B12) 上风向无遮挡处于自由流风况, lin4(B31 ~ B42) 和南区 lin5(B43 ~ B55) 处于下风向(见图 9),统计各机组同期正常运行状态下(不包括满发状态)的实际出力进行对比分析。

结果如下(见图 10):

1) 上风向无遮挡处于自由流的 lin1 (B1~B12) 机组发电能力差异不大,说明该扇区范围内,东、西向风资源相近。

2) lin5(B43~B55) 处于风场北区的下风向,由西向东受上风向场区尾流影响程度不同,较自由流 lin1 发电降低 8%~20% 之间,说明该扇区范围内,受

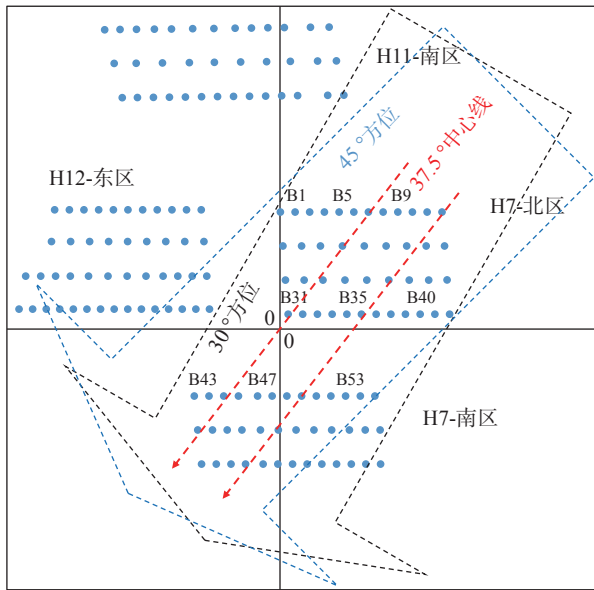


图 9 不同扇区条件下(30°~45°)的尾流效应影响场景
Fig. 9 Scenes affected by wake effect under different sector conditions (30°~45°)

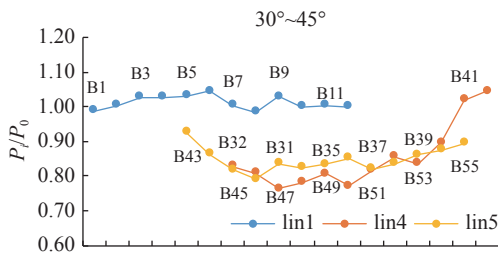


图 10 各机组 30°~45°扇区下发电量归一化统计分布图
Fig. 10 Distribution diagram of power generation normalization of WTGS under different sector conditions (30°~45°)

上风向相邻场区影响明显,“尾流效应”导致的电量降幅较大。

3)延尾流中心线 37.5°方向各机组叠加尾流影响:对比 lin1(B7 ~ B12)&lin4(B31 ~ B36)&lin5 (B45 ~ B50),南区 lin5 机组离相邻场区的 lin4 间隔了 4.3 km (33.3D) 左右的缓冲带, lin4、lin5 较自由流机组发电分别降低 20%~24%、15%~20%, lin5 机组较 lin4 平均发电提升了 3%,说明该缓冲区距离,对风速有一定的恢复作用,下风向风场机组发电有一定提升。

场景 3: 345° ~ 360°扇区条件下, H7 北区西部部分机组受上风向 H11 风场影响,南区东部部分机组处于最下风向(见图 11),统计各机组同期正常运行状态下(不包括满发状态)的实际出力进行对比分析。

结果如下(见图 12):

1)上风向无风场遮挡的 lin1(B9~B12) 机组,由西向东发电差异不大,说明该扇区由西向东风资源相近;北区 lin1 离上风向 H11 风电场最近风机排组间隔 4.3 km(33D) 左右的缓冲带, lin1(B1 ~ B8) 机组受上风向相邻风场 H11 影响,发电较自由流机组降低 8% ~ 18% 之间,说明该缓冲带距离下机组仍受上风向相邻场区的影响,风速衰减导致发电降低。

2)南区 lin5(B43 ~ B47) 处于 H11、H12 场区下风向,中间间隔了 3.05 km(23.4D) 左右的缓冲带,机组受上风向影响程度不同,发电能力呈逐渐增大趋势,较自由流机组发电降低幅度在 20%~27% 之间,

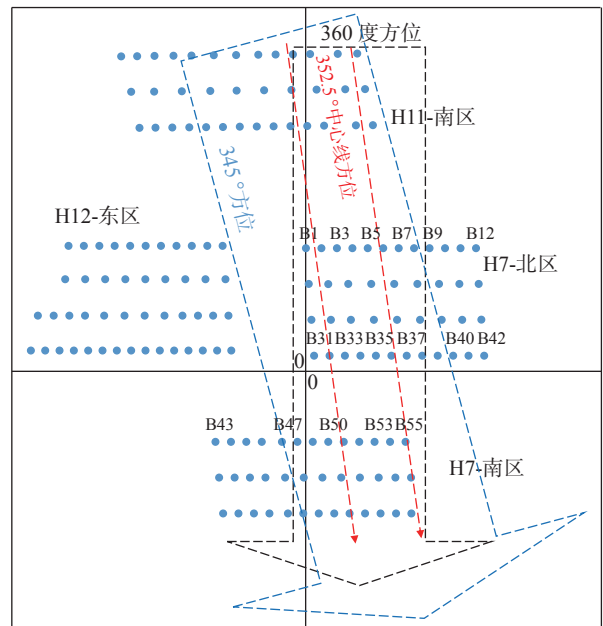


图 11 不同扇区条件下(345°~360°)的尾流效应影响场景
Fig. 11 Scenes affected by wake effect under different sector conditions (345°~360°)

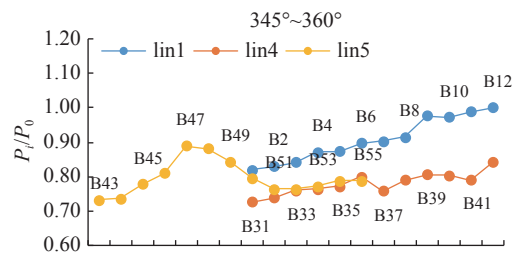


图 12 各机组(345°~360°)扇区下发电量归一化统计分布图
Fig. 12 Distribution diagram of power generation normalization of WTGS under different sector conditions (345°~360°)

说明该缓冲带距离下机组受上风向相邻场区的影响风速衰减导致发电降低。

3) 延尾流中心线 352.5° 方向各机组叠加尾流影响: 对比 lin1(B2 ~ B6) & lin4(B32 ~ B36) & lin5(B51 ~ B55), 南区 lin5 离相邻场区北区 lin4 间隔 4.05 km (31D) 左右的缓冲带, 叠加尾流影响后的 lin5(B51 ~ B55) 较自由流机组发电降低 20% ~ 24% 之间, 较 lin4(B32 ~ B36) 发电相差不大, 说明该扇区条件下多重叠加尾流影响后, 缓冲带有一定的风速恢复作用, 下风向风场风速没有进一步衰减。

3 结论

本文利用海上大型风电场风电机组实际运行 SCADA 数据结合激光雷达同期实测风数据, 基于不同的风向扇区条件和风电场机组实际排布进行尾流效应场景分类, 进而开展实际运行相邻风电场间的真实“尾流效应”分析工作。结论如下:

1) 对于规则排布的海上大型风电场, 基于实际运行 SCADA 数据选取参照基准机组, 对各机组发电量进行归一化, 可以较好地反映海上风能资源分布特征及各机组发电能力的差异。

2) 单一、高度集中的扇区条件下, 相邻风电场处于下风向的场区受“尾流效应”的影响, 发电产能降幅较自由流降幅较大, 对于风向高度集中的中低风速区域, 需着重考虑周边相邻风电场带来的尾流损失影响。

3) 相邻风场间随着缓冲带距离的增加, 下风向场区机组尾流电量衰减比随之降低, 缓冲带需达到一定的距离, 对于风速的恢复有明显的作用, 发电产能才能够有所提升, 本案例单一扇区条件下, 23D ~ 44D 缓冲带距离下, 尾流损失比在 27% ~ 4% 之间; 缓冲带距离是场群“尾流效应”影响因素之一, 距离越大越有利于降低尾流损失, 但与周边相邻风电场项目容量、机组数量、机型、排布方案、风向频率分布等多因素相关, 需综合考虑。

当然不同区域的风电场如气候条件、风速、风向、风频分布等存在差异, 上述研究结论仅代表该风电场项目案例特征, 后续可以收集更多不同区域海上风电场项目进行进一步分析与总结。

参考文献:

- [1] ASTARIZ S, IGLESIAS G. Enhancing wave energy competitiveness through co-located wind and wave energy farms. a review on the shadow effect [J]. *Energies*, 2015(8): 7344-7366. DOI: 10.3390/en8077344.
- [2] HASAGER C B, VINCENT P, BADGER J, et al. Using satellite SAR to characterize the wind flow around offshore wind farms [J]. *Energies*, 2015(8): 5413-5439. DOI: 10.3390/en8065413.
- [3] FRANDBSEN S, BARTHELMIE R, PRYOR S, et al. Analytical modelling of wind speed deficit in large offshore: wind farms [J]. *Wind Energy*, 2006, 9(1): 39-53. DOI: 10.1002/we.189.
- [4] 陈树勇, 戴慧珠, 白晓民, 等. 尾流效应对风电场输出功率的影响 [J]. *中国电力*, 1998, 31(11): 28-31.
CHEN S Y, DAI H Z, BAI X M, et al. Impact of wind turbine wake on wind power output [J]. *Electric Power*, 1998, 31(11): 28-31.
- [5] 刘沙, 王中权, 蔡彦枫. 海上风电场运行期尾流损失分析 [J]. *南方能源建设*, 2019, 6(1): 66-70. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.011.
LIU S, WANG Z Q, CAI Y F. Wake loss analysis of offshore wind farm in operation [J]. *Southern Energy Construction*, 2019, 6(1): 66-70. DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.011.
- [6] 温建民, 张新旺, 陈锋, 等. 基于风电场实测的风机尾流特征分析 [J]. *机械工程与自动化*, 2021(1): 3-6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6413.2021.01.002.
WEN J M, ZHANG X W, CHEN F, et al. Analysis of wind turbine wake characteristics based on wind farm field measurement [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2021(1): 3-6. DOI: 10.3969/j.issn.1672-6413.2021.01.002.
- [7] 李岩, 吴迪, 洪畅, 等. 大型海上风电场风机排布优化策略研究 [J]. *太阳能*, 2020(2): 67-74. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2020.02.011.
LI Y, WU D, HONG C, et al. Optimization of wind turbine layout in large-scale offshore wind farm [J]. *Solar Energy*, 2020(2): 67-74. DOI: 10.3969/j.issn.1003-0417.2020.02.011.
- [8] 郑建才, 万德成, 王尼娜, 等. 基于尾流叠加模型的风电场数值模拟 [C]//《水动力学研究与进展》编委会, 中国力学学会流体力学专业委员会水动力学专业组, 集美大学, 等. 第三十一届全国水动力学研讨会, 中国福建厦门, 2020-10-30. 北京: 海洋出版社, 2020: 833-847. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.037043.
ZHEN J C, WAN D C, WANG N, et al. Numerical solution of wind farm wake based on wake interaction model [C]// Editorial Board of *Research and Progress in Hydrodynamics*, Hydrodynamics Professional Group of Hydromechanics Committee of Chinese Society of Mechanics, Jimei University, et al. Thirty-first National Symposium on Hydrodynamics, Xiamen, Fujian, China, 2020-10-30. Beijing: China Ocean Press, 2020: 833-847. DOI: 10.26914/c.cnkihy.2020.037043.

- [9] TC88. Wind turbines-part 12-1: power performance measurements of electricity producing wind turbines: IEC 61400-12-1 [S]. Genève: International Electrotechnical Commission, 2005.
- [10] 杨昆, 姜婷婷, 朱金奎, 等. 大规模风电场实际尾流分析与算法研究 [C]// 中国农机工业协会风力机械分会. 第七届中国风电后市场交流合作大会, 中国江苏无锡, 2020-8-26. 北京: 中国农机工业协会风力机械分会, 2020: 81-86. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2020.011484](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2020.011484).
Y K, J T T, ZHU J K, et al. Research on the actual wake of large scale wind farm and algorithms [C]// China Agricultural Machinery Industry Association Wind Machinery Branch. The 7th China Wind Power Aftermarket Exchange and Cooperation Conference, Wuxi, Jiangsu, China, 2020-8-26. Beijing: China Agricultural Machinery Industry Association Wind Machinery Branch, 2020: 81-86. DOI: [10.26914/c.cnkihy.2020.011484](https://doi.org/10.26914/c.cnkihy.2020.011484).
- [11] MITTELMEIER N, et al. An analysis of offshore wind farm SCADA measurements to identify key parameters influencing the magnitude of wake effects [J]. *Wind Energy Science*, 2017(2): 477-490. DOI: [10.5194/wes-2-477-2017](https://doi.org/10.5194/wes-2-477-2017).
- [12] 许帅, 邓智文, 汪健文, 等. 偏航工况下风电机组尾流模型与风电场尾流叠加研究 [J]. *能源研究与利用*, 2015(4): 27-30+49. DOI: [10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2018.04.011](https://doi.org/10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2018.04.011).
XU S, DENG Z W, WANG J W, et al. Study on wind turbine wake model and wake superposition under the yaw condition [J]. *Energy Research & Utilization*, 2015(4): 27-30+49. DOI: [10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2018.04.011](https://doi.org/10.16404/j.cnki.issn1001-5523.2018.04.011).
- [13] 杨志超, 高丙团, 叶飞, 等. 基于尾流效应的风电场最大出力优化控制 [J]. *电力建设*, 2017, 38(4): 96-102. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7229.2017.04.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7229.2017.04.013).
YANG Z C, GAO B T, YE F, et al. Maximum output optimal control of wind farm based on wake effect [J]. *Electric Power Construction*, 2017, 38(4): 96-102. DOI: [10.3969/j.issn.1000-7229.2017.04.013](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-7229.2017.04.013).
- [14] MITTELMEIER N, BLODAU T, KÜHN M. Monitoring offshore wind farm power performance with SCADA data and an advanced wake model [J]. *Wind Energy Science*, 2017, 2(1): 175-187. DOI: [10.5194/wes-2-175-2017,2017](https://doi.org/10.5194/wes-2-175-2017,2017).
- [15] 李岩, 罗辛, 费伊, 白雪. 基于运营风机scada数据的风电场尾流损失测量方法: CN106321368B [P]. 2019-02-15.
LI Y, ROSIN F, BAI X. The method of measuring wake loss in wind farm based on scada data of operating wind turbines: CN106321368B [P]. 2019-02-15.

作者简介:



崔冬林

沙伟

1990-, 男, 江苏盐城人, 高级工程师, 地理信息系统专业, 学士, 主要从事海上风电场风资源评估相关工作 (e-mail) shawei@goldwind.com。

刘树洁

1991-, 女, 四川攀枝花人, 工程师, 新能源规划专业, 硕士, 研究方向为风力发电技术、风能资源评估等 (e-mail) liu_sj@hdec.com。

陈秋阳

1990-, 男, 河南周口人, 工程师, 流体力学专业, 硕士, 主要从事新能源项目规划、风电场资源评估与微观选址设计工作 (e-mail) chen_qy4@hdec.com。

王尼娜

1982-, 女, 辽宁沈阳人, 高级工程师, 新能源规划专业, 学士, 研究方向为新能源规划及设计 (e-mail) wang_nn@ecidi.com。

(编辑 李辉)