

考虑流动时滞效应的风电场偏航协同控制研究

葛铭伟¹, 陈 迪¹, 常斯语^{1,2}, 李 莉¹

(1. 华北电力大学新能源学院, 北京 102206; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司新能源工程院, 西安 710065)

摘 要: 为减少风电场内尾流损失,提升整场发电量,基于偏航控制的整场协同控制已成为当前的研究热点。针对现有研究未能充分考虑来流的动态变化和风电场流动的时滞效应等问题,采用高保真大涡模拟方法对风电场流动进行数值仿真,通过流场和邻近机组功率时空相关性确定机组间流动延迟时间,考虑流场流动延迟时间,提出一种湍流入流条件下的风电机组动态偏航控制策略。模拟结果表明,稳态偏航和最佳的动态偏航控制下,风电机组阵列总发电量比无偏航控制下分别提高 11.5% 和 12.5%。相较于稳态偏航控制,动态偏航控制下风电机组间尾流发展更充分,尾流速度恢复更快。

关键词: 风电场; 大涡模拟; 尾流; 偏航控制; 动态入流; 流场时空相关性

中图分类号: TK614

文献标志码: A

0 引 言

近年来,风力发电发展迅速,风电场的规模和数量不断增长。在风电场中,上游来流经过风电机组,会在机组下游产生低风速、高湍流的尾流区域,使得下游机组功率显著降低,疲劳损伤增加^[1]。丹麦陆上风电场 Nørrekær 的测量数据显示,首排风电机组尾流可导致下游机组发电量减少约 50%^[2],由于尾流湍流强度的增加,浸没在尾流中的风电机组疲劳载荷会增加 4%~16%^[3]。因此,如何减少风电场尾流效应已成为风电研究的热点问题,对提升整场发电量和运行寿命具有重要意义。在风电场工程中,人们主要通过微观选址优化和运行控制来减少风电场尾流效应。在风电场规划阶段,可通过微观选址减少尾流损失,减低建设成本^[4-5]。而对于已建成的风电场,主要通过风电机组的整场协同控制来减少整场的尾流效应,提升整场的运行效率。目前常用的控制策略包括偏航协同控制、轴向诱导协同控制和两者的联合控制等。文献[6-7]证实,相对于轴向诱导控制,偏航协同控制具有执行简单、控制效果好等特点,已受到工业界广泛关注,应用推广价值巨大。

学术界针对风电场偏航协同控制开展了大量研究,获得了显著进展。Adaramola 等^[8]通过风洞测量对两台串联模型风电机组偏航控制进行了研究,结果显示当上游风电机组偏航 30°、两机组流展向间距为 4D 和 0.4D(D 为风轮直径)时,上游风电机组对下游风电机组的遮挡效应明显减小,总发电量可提升 12%; Fleming 等^[9-10]通过大涡模拟(large eddy simulation, LES)研究发现,上游风电机组偏航所产生的尾流偏转会提高下游机组发电量,同时降低其疲劳载荷; Park 等^[11]采

用贝叶斯上升算法通过实时控制风电机组的俯仰角和偏航角对串联 4 台机组进行了协同优化,数值仿真结果显示该方法可使总功率提高约 27%; Gebraad 等^[12]通过稳态气流重定向和诱导(flow redirection in steady-state, FLORIS)模型,对 3 个风向下 6 台风电机组进行了偏航优化,结果表明在主风向±5°范围下,风电场的发电量增加了约 13%; 马鸿亮等^[13]通过对中性大气下 5 台串联风电机组进行大涡模拟,结果表明考虑偏航协同优化策略下机组总功率最大提升约 17.5%。

目前风电场偏航协同控制策略主要面向稳态来流,未考虑风电场来流的动态波动及其对机组影响的时滞效应。一些学者考虑到入流风向的不确定性,提出更具鲁棒性的控制策略,但并未将流场的流动特性与风电机组的延迟响应规律相结合,未能实现动态来流条件的动态偏航协同控制。基于此,本文基于相邻机组功率波动的时间相关性,定量获取流动的时滞效应,更加契合风电机组的延迟响应机理,进而将延迟响应与目前较为成熟的稳态偏航协同控制策略相结合,提出一种考虑流动时滞效应的动态偏航协同控制策略并利用大涡模拟验证其有效性。

1 数值模拟方法及算例设置

1.1 数值模拟方法

为获取风电场流动的高保真数据,借助风电场应用模拟器(simulator for wind farm application, SOWFA)对湍流大气边界层和风电机组尾流场进行大涡模拟计算。在数值求解中,将风轮简化为旋转致动盘模型。控制方程采用不可压缩 N-S 方程和连续性方程,采用 Smagorinsky 涡黏模型对上述方程

收稿日期: 2025-02-06

基金项目: 国家重点研发计划(2023YFB4203200)

通信作者: 葛铭伟(1983—), 男, 博士、教授, 主要从事风力机和风电场空气动力学方面的研究。gemingwei@ncepu.edu.cn

封闭。为生成更为真实的湍流,首先对大气边界层进行数值模拟,流向和水平两侧边界采用周期性边界条件,底部采用平衡壁面模型,底面上垂直方向速度为零,顶部采用滑移边界,当流动充分发展后即可得到顶部驱动力作用下产生的大气环境湍流;随后设置新的计算域,将生成的大气环境湍流作为新计算域的入流条件,风电机组布置于入口下游,如图1所示。流向出口边界采用压力出口边界,水平两侧采用周期性边界,顶部采用零压力梯度,底部边界条件仍采用平衡壁面模型,详细设置可参见文献[14]。

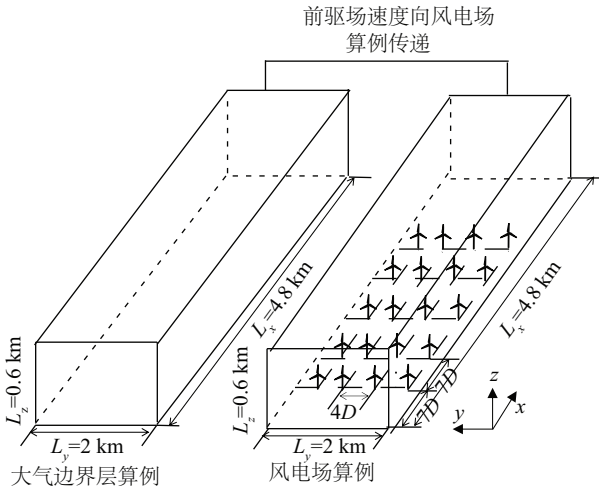


图1 风电场模拟示意图

Fig. 1 Schematic diagram of wind farm simulation

1.2 算例设置

为对比不同控制策略下协同控制效果,设置7个算例。算例中风电机组阵列由20台机组组成,流向5行,展向4列,流向机组间距为 $7D$,展向机组间距为 $4D$,首列机组距速度入口间距为 $7D$ 。采用的风电机组轮毂高度和风轮直径 D 均为100 m,地表粗糙度为0.1 m。所有算例的计算域和网格数量均相同,计算域在流向、展向和垂向为 $4.8\text{ km} \times 2\text{ km} \times 0.6\text{ km}$,所采用的网格为 $480 \times 200 \times 60$ 个。

在所有算例中,算例1为湍流入流条件下的风电机组阵列尾流场数值模拟,未施加风电场控制手段,作为基准算例。为获得充分发展的大气边界层湍流入流,采用大涡模拟方法对大气边界层开展约35000 s的数值模拟,其中前30000 s用于湍流大气环境的形成并使流动充分发展,在充分发展状态下,大气来流轮毂高度平均速度约为7.5 m/s,湍流强度约为8.8%,后5000 s用于提取入口处速度剖面,作为风电机组尾流场计算的动态入流边界,待风电场流动充分发展后,开始对物理量统计平均,统计时长为1800 s。算例2为稳态偏航控制的算例,即:假定来流为稳态来流,来流速度为入流湍流的平均速度,以发电量最大化为目标开展偏航协同控制优化,获得每个机组的偏航角。在大涡模拟当中,设定偏航角不变,获得风电场的流场即发电效率。算例3(包含算例3-1~算例3-5)为动态偏航算例,该类算例在数值模拟过程中,机

组偏航角随来流波动动态变化。为揭示来流采样时间对控制效果的影响,设置1、10、30、60、180 s这5种采样时间,并根据采样时间段来流风速的平均值,考虑流动的时滞效应设定整场偏航角。

表1对7个算例进行总结,列出了控制类型、采样时间和统计时间等关键参数。

表1 不同算例设置

Table 1 Different case settings

算例	偏航类型	采样时间 $\Delta T/\text{s}$	统计时间 T/s
算例1	无偏航		1800
算例2	稳态偏航		1800
算例3-1	动态偏航	180	1800
算例3-2	动态偏航	60	1800
算例3-3	动态偏航	30	1800
算例3-4	动态偏航	10	1800
算例3-5	动态偏航	1	1800

2 风电场动态偏航协同控制策略

2.1 风电场动态偏航控制策略

本文基于较为成熟的稳态偏航优化算法考虑时变来流的时滞效应,提出时变入流条件的风电场动态偏航协同控制策略。其中,稳态偏航优化过程以风电场整场发电量最大化为优化目标,采用Shapiro尾流模型^[15],使用平方和叠加方法计算下游机组的速度损失,通过遗传算法给出每台机组的偏航角,详细信息可参考文献[13]。流动的时滞效应通过相邻风电机组功率波动的时间相关曲线确定。图2给出了风电场动态偏航控制的示意图,具体步骤为:

1) 将风电机组来流的统计时间划分成相等的时间段 ΔT (采样时间),在轮毂高度速度入口中心处设置风速监测点,计算采样时间 ΔT 间隔内风速的平均值 U_i ;

2) 根据风电场稳态偏航控制算法确定 U_i 风速下每行风电机组的偏航角 θ_{ij} ,其中 i 表示第 i 个时间段, j 表示下游第 j 行风电机组;

3) 确定偏航角相对于来流的滞后时间 Δt ,即:对于第 i 台机组,步骤2)确定的稳态偏航角施加时间相对于来流监测时间段的滞后时间。首行风电机组的延迟偏航时间可由与监测点的距离和大气来流的平均速度求出,故 $\Delta t_1 = 93\text{ s}$;为便于描述,定义流动自第 i 行机组发展至第 $i+1$ 行机组的时间(即第 i 行机组至第 $i+1$ 行机组的延迟时间)为 $\Delta t_{i(i+1)}$,则有式(1)。机组间的流动延迟时间 $\Delta t_{i(i+1)}$ 则由相邻机组的功率时空相关性曲线求出,2.2节将详细介绍其求法。

$$\Delta t = \begin{cases} \Delta t_1, i=1 \\ \Delta t_1 + \sum_{k=1}^{i-1} \Delta t_{k(k+1)}, 1 < i \leq 5 \end{cases} \quad (1)$$

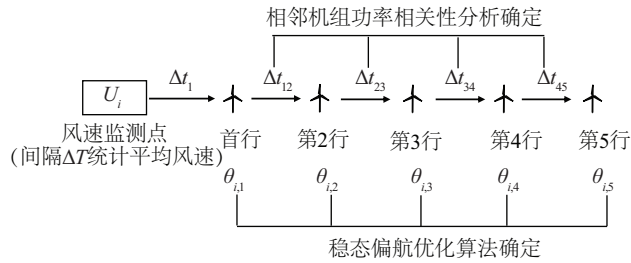


图2 风电场动态偏航控制示意图

Fig. 2 Schematic diagram of dynamic yaw control for wind farms

2.2 风电机组尾流延迟时间求解

机组间尾流演化规律极其复杂,流动速度流向变化大。在真实的风电场运行过程中难以对风电场进行实时流场模拟或者精细测量确定尾流流向速度,尾流演化时间所代表时滞效应难以量化。考虑机组来流风速与功率的对应关系,从风电场流动演化的角度可以确定,风电场相邻的上下游机组功率存在时间相关性,通过对相邻风电机组的功率进行时空相关性分析可定量获取流动的时滞效应,为风电场动态偏航控制提供输入参数。上下游机组功率波动的相关性可通过时间相关系数表示,表达式为:

$$\rho_{ij} = \frac{R(\vec{r}, \tau)}{\sqrt{\langle p'^2(\vec{x} + \vec{r}, t + \tau) \rangle_t} \sqrt{\langle p'^2(\vec{x}, t) \rangle_t}} \quad (2)$$

$$R(\vec{r}, \tau) = \langle p'(\vec{x} + \vec{r}, t + \tau) p'(\vec{x}, t) \rangle_t \quad (3)$$

式中: ρ_{ij} ——第 i 行和第 j 行机组功率的相关性系数; $R(\vec{r}, \tau)$ ——流场中流向距离为 $\vec{r}$, 时间间隔为 τ 的两点的协方差; $\vec{r}$ ——流向间隔距离矢量, 为正方向; τ ——时间间隔, s; $\langle p'^2(\vec{x}, t) \rangle_t$ ——功率波动平方的时间平均值。

对于算例 1 中的 5 行 4 列风电机组, 依次分析上下游相邻机组功率的时空相关特性并在 4 列开展平均, 结果如图 3 所示。可以发现, 上下游相邻机组功率相关性随时间先增后减, 根据上下游机组功率相关性的物理概念, 相关性系数曲线峰值所应对的时间为机组间流动的对流时间, 可近似看作

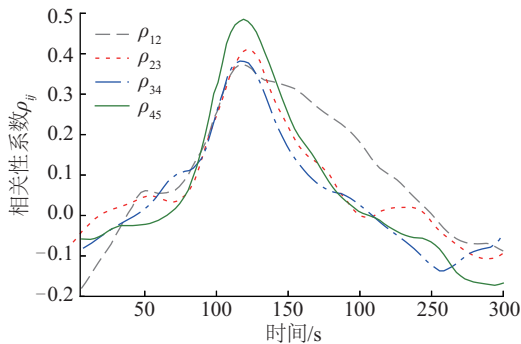


图3 算例1中上下游相邻机组功率的相关性系数曲线

Fig. 3 Curves of correlation coefficients between power of upstream and downstream neighboring units in Case 1

流动自上游机组到下游机组的延迟时间。4 条曲线的极值点坐标对应的时间分别为 109.25、126.50、110.25、112.75 s。表 2 将相邻机组间尾流演化时间和相关系数所确定的对流时间进行了对比, 发现两者误差在 5% 以内。由于机组间尾流的相似性, 不同下游位置处机组间尾流的对流时间差异不大, 为简化控制策略, 取平均值 112 s 作为相邻风电机组间的延迟偏航时间。

表2 算例1中尾流演化时间和相邻机组间功率相关性曲线峰值时间对比表

Table 2 Comparison of wake evolution times and peak times of power correlation curves between neighboring units in Case 1

机组位置	相关系数曲线峰值时间/s	实际尾流演化时间/s	误差/%
第1~2行	109.25	110.60	1.22
第2~3行	126.50	128.79	1.78
第3~4行	110.25	111.96	1.53
第4~5行	112.75	115.19	2.12

3 结果与讨论

3.1 风电场整场发电效率的提升效果

为揭示不同控制策略下风电场整场发电效率的提升效果, 以算例 1 (不施加任何偏航控制) 为基准, 比较稳态偏航协同控制和 5 种采样时间下 ($\Delta T=1, 10, 30, 60, 180$ s) 动态偏航协同控制策略的效果。图 4 给出了无偏航、稳态偏航和 $\Delta T=60$ s 下动态偏航协同控制策略下风电场整场功率随时间的变化情况 (图中垂直虚线为偏航动作开始时刻)。采用的稳态偏航协同控制按照 1800 s 时间段内平均来流风速为基准开展优化, 获得风电场所有机组的偏航角并保持不变。考虑来流至首台机组的时滞效应, 当 $t < 93$ s 时, 动态偏航协同控制策略与稳态偏航协同控制策略保持一致, 当 $t \geq 93$ s 时, 按照 2.1 节介绍的动态偏航控制方案施加控制。可以发现, 在施加控制后, 动态偏航功率曲线逐渐高于稳态偏航功率曲线。

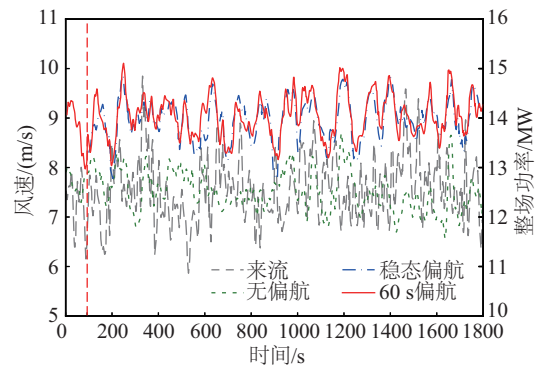
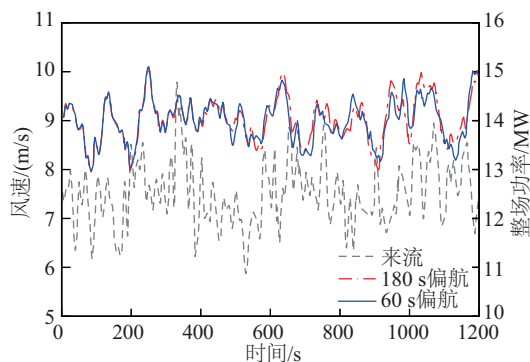


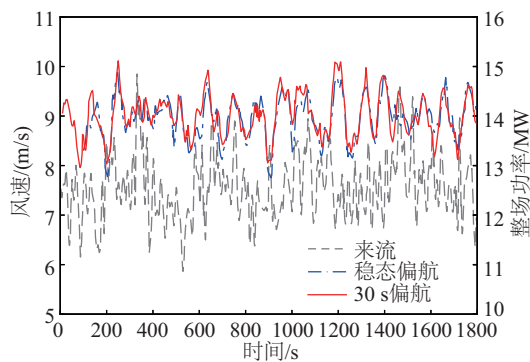
图4 算例1、算例2、算例3-2风电场整场功率对比

Fig. 4 Comparison of whole power of wind farms in Case 1, Case 2 and Case 3-2

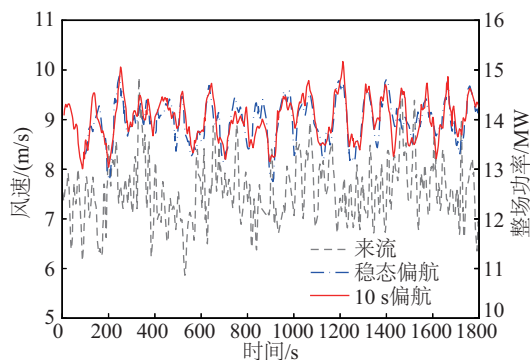
图 5a 所示为 $\Delta T=180, 60$ s 采样时间下动态偏航下风电场整场功率随时间变化情况。可以发现, 两条曲线功率峰值



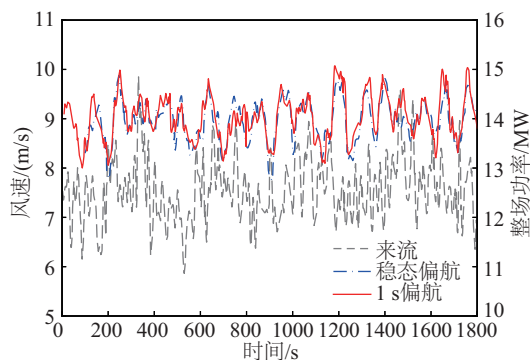
a. 算例 3-1、算例 3-2



b. 算例 2、算例 3-3



c. 算例 2、算例 3-4



d. 算例 2、算例 3-5

图 5 各风电场整场功率对比

Fig. 5 Comparison of whole power of wind farms in different cases

交替出现, 发电效率提升效果相当。图 5b~图 5d 分别为 $\Delta T=30, 10, 1$ s 采样时间下动态偏航控制与稳态偏航控制风电场整场功率随时间变化情况。相较于 $\Delta T=180, 60$ s 动态偏航控制, 这 3 种动态偏航控制操作频率相对较高, 相较于前两种采样时间无法取得较高的盈余发电量积累, 但仍较无偏航组存在一定提升。

表 3 列出了 180 s 统计时间内不同偏航控制策略下风电场整场发电量 G_{tot} 和相较无偏航情况的提升比例 η 。可以看出, 稳态偏航控制提升约 11.5%; 对于不同采样时间的动态偏航控制策略, $\Delta T=60$ s 获得的提升比例最高, 约为 12.5%。

表 3 不同偏航控制策略下风电场整场发电量及提升比例

Table 3 Overall power generation and enhancement ratio of wind farms with different yaw control strategies

算例	$G_{\text{tot}}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	$\eta/\%$	算例	$G_{\text{tot}}/(\text{kW} \cdot \text{h})$	$\eta/\%$
算例 1	6262		算例 3-3	7016	12.0
算例 2	6981	11.5	算例 3-4	7010	11.9
算例 3-1	7025	12.2	算例 3-5	7015	12.0
算例 3-2	7045	12.5			

3.2 风电机组阵列尾流场分析

图 6 给出了无偏航、稳态偏航以及 5 种采样时间下动态偏航控制的风电机组阵列轮毂高度处的平均速度云图。可以看出, 经过稳态偏航控制优化后, 尾流速度明显改善, 相较于无偏航尾流场, 尾流损失较大的区域分布较少并且尾流区域明显偏转, 对下游机组的影响降低。相较于稳态偏航控制, 动态偏航控制下尾流速度进一步小幅提升。

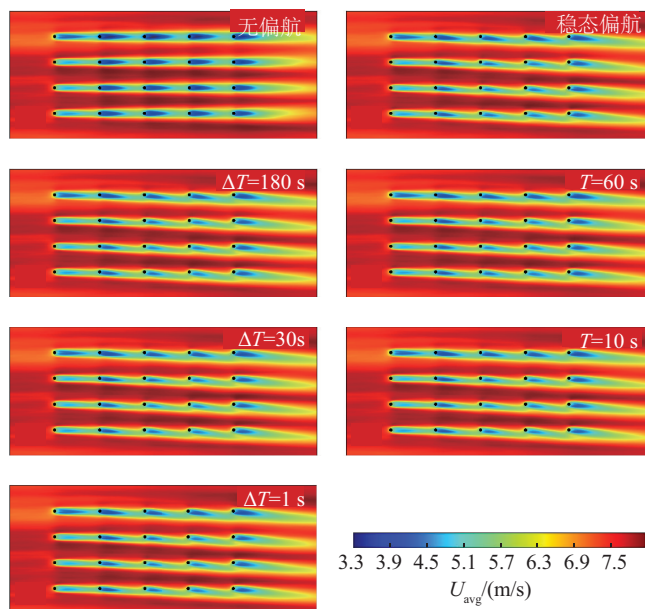


图 6 无偏航和偏航风电场尾流场平均速度云图

Fig. 6 Contour of mean velocity in wake field of yaw-free wind farm and yawed wind farm

图 7 定量给出了归一化的最大速度亏损随下游距离变化情况,其中 $(U_{\infty} - U)_{\max} / U_{\infty}$ 表示归一化的最大速度亏损。从图 7 可看出,相较于无偏航情况,稳态偏航和 5 种动态偏航下风力机尾流最大速度亏损显著减少,尾流速度迅速恢复。

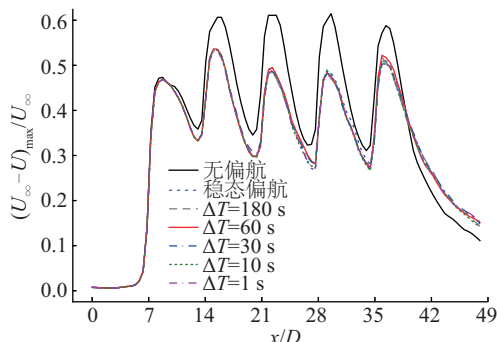


图 7 归一化的最大速度亏损沿下游距离变化

Fig. 7 Normalized maximum velocity deficit along downstream distance

图 8 定量给出了 ΔU 随下游距离变化情况,其中 ΔU 表示动态偏航与稳态偏航下轮毂高度处尾流场平均速度差值。从图 8 可看出,动态偏航作用下,下游第 2~4 排机组的尾流恢复较快,速度总体有小幅增高,从而提升了风电机组阵列总发电量。在 5 种动态偏航中, $\Delta T=60$ s 动态偏航与稳态偏航的速度差最高,尾流速度损失最低,从而大幅提升了风电场整场的发电量。

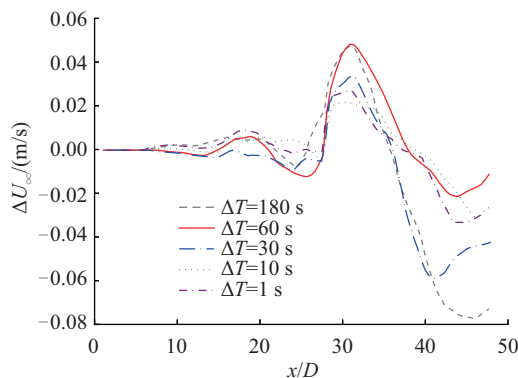


图 8 动态偏航与稳态偏航平均速度差值沿下游距离变化

Fig. 8 Dynamic yaw and static yaw mean velocity difference along downstream distance

4 结 论

本文基于相邻机组功率的时空相关性分析,定量求出机组间流场流动的延迟时间,结合稳态偏航控制算法,建立考虑上下游机组延迟动作的动态偏航控制策略。通过与无偏航、稳态偏航控制进行对比,发现偏航动作间隔时间 $\Delta T=60$ s 的动态偏航控制策略最优,相较于无偏航,稳态偏航和最优

动态偏航使机组阵列发电量分别提升 11.5%、12.5%。通过对风电机组阵列的尾流场分析,动态偏航相较于稳态偏航更有利于尾流速度的恢复,其中 $\Delta T=60$ s 动态偏航尾流发展最充分,尾流速度恢复更快。

[参考文献]

- [1] SAIDUR R, ISLAM M R, RAHIM N A, et al. A review on global wind energy policy [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, 14(7): 1744-1762.
- [2] ARCHER C L, VASEL-BE-HAGH A, YAN C, et al. Review and evaluation of wake loss models for wind energy applications [J]. Applied energy, 2018, 226: 1187-1207.
- [3] THOMSEN K, MADSEN H A, LARSEN G C, et al. Comparison of methods for load simulation for wind turbines operating in wake [J]. Journal of physics: conference series, 2007, 75(1): 012072.
- [4] BOERSMA S, DOEKEMEIJER B, VALI M, et al. A control-oriented dynamic wind farm model: WFSim [J]. Wind energy science, 2018, 3(1): 75-95.
- [5] SHAKOOR R, HASSAN M Y, RAHEEM A, et al. Wake effect modeling: a review of wind farm layout optimization using Jensen's model [J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2016, 58: 1048-1059.
- [6] 李雄威, 徐家豪, 朱润泽, 等. 基于偏航尾流模型的风电场功率协同优化研究 [J]. 太阳能学报, 2022, 43(10): 144-151.
- LI X W, XU J H, ZHU R Z, et al. Study on power collaborative optimization of wind farm based on yaw wake model [J]. Acta energiae solaris sinica, 2022, 43(10): 144-151.
- [7] 顾波, 胡昊, 刘永前, 等. 考虑尾流效应的风电场优化控制技术研究 [J]. 太阳能学报, 2018, 39(2): 359-368.
- GU B, HU H, LIU Y Q, et al. Study of wind farm optimal control technology considering wake effect [J]. Acta energiae solaris sinica, 2018, 39(2): 359-368.
- [8] ADARAMOLA M S, KROGSTAD P Å. Experimental investigation of wake effects on wind turbine performance [J]. Renewable energy, 2011, 36(8): 2078-2086.
- [9] FLEMING P A, GEBRAAD P M O, LEE S, et al. Evaluating techniques for redirecting turbine wakes using SOWFA [J]. Renewable energy, 2014, 70: 211-218.
- [10] FLEMING P, GEBRAAD P M O, LEE S, et al. Simulation comparison of wake mitigation control strategies for a two-turbine case: simulation comparison of wake mitigation control strategies for a two-turbine case [J]. Wind energy, 2015, 18(12): 2135-2143.
- [11] PARK J, LAW K H. A data-driven, cooperative wind farm control to maximize the total power production [J]. Applied

- energy, 2016, 165: 151-165.
- [12] GEBRAAD P M O, TEEUWISSE F W, VAN WINGERDEN J W, et al. Wind plant power optimization through yaw control using a parametric model for wake effects-a CFD simulation study: wind plant optimization by yaw control using a parametric wake model [J]. Wind energy, 2016, 19(1): 95-114.
- [13] MA H L, GE M W, WU G X, et al. Formulas of the optimized yaw angles for cooperative control of wind farms with aligned turbines to maximize the power production[J]. Applied energy, 2021, 303: 117691.
- [14] BUSINGER J A, WYNGAARD J C, IZUMI Y, et al. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer [J]. Journal of the atmospheric sciences, 1971, 28 (2) : 181-189.
- [15] SHAPIRO C R, GAYME D F, MENEVEAU C. Modelling yawed wind turbine wakes: a lifting line approach [J]. Journal of fluid mechanics, 2018, 841: R1.

RESEARCH ON COOPERATIVE YAW CONTROL OF WIND FARM CONSIDERING FLOW DELAY EFFECTS

Ge Mingwei¹, Chen Di¹, Chang Siyu^{1,2}, Li Li¹

(1. School of New Energy, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. New Energy Engineering Institute, PowerChina Northwest Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to reduce the wake loss in the wind farm and enhance the whole field power generation, the whole field cooperative control based on yaw control has become a current research hotspot. To address issues such as existing studies not fully considering the dynamic changes in incoming flow and the time-lag effects of wind farm flow, a high-fidelity large eddy simulation method is used to numerically simulate the wind farm flow, and the flow delay time between units is determined by the spatial and temporal correlation between the flow field and the power of the neighboring units. Considering the flow delay time of the flow field, a dynamic yaw control strategy is proposed for the wind turbine under the turbulent inflow conditions. The large eddy simulation results show that the total power generation of the wind turbine array under static yaw and optimal dynamic yaw control is increased by 11.5% and 12.5%, respectively, compared with that under no yaw control. Compared to the static yaw control, the wake development between the wind turbine array is more fully developed and the wake velocity recovery is faster under dynamic yaw control.

Keywords: wind farm; large eddy simulation; wakes; yaw control; dynamic inflow; flow field spatial-temporal correlation