

# 考虑尾流效应的风电机组启停优化研究

尹佐明<sup>1</sup>, 王晓东<sup>2</sup>, 关 宏<sup>1</sup>, 刘文秀<sup>1</sup>, 刘漫川<sup>1</sup>, 滕依海<sup>1</sup>

(1. 吉林龙源风力发电有限公司, 长春 130022; 2. 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 北京 102206)

**摘 要:** 以某典型风电场为例, 采用尾流模型模拟研究风电机组启停优化对风电机组尾流干涉和发电量的影响。在速度恢复系数小于0.06时, 典型机位的停机可增加风电场全场发电量。以中国北方某实际风电场为例进行现场试验, 在主风向向下, 通过调度上游风电机组的启停, 实现区域内风电机组发电量提升, 验证方法的有效性。

**关键词:** 风电场; 风力机; 尾流; 控制; 复杂地形; 外场试验

**中图分类号:** TK83

**文献标志码:** A

## 0 引 言

随着风电的迅速发展, 风电场的数量越来越多。尾流是风电场发电量损失的重要因素之一, 也是当前风电场流动模拟的难点之一<sup>[1]</sup>。来流风经过风轮后, 部分能量被风轮吸收, 导致风轮下游的速度降低, 使得处于尾流区内的风电机组来流速度下降, 发电量减少, 称为尾流损失<sup>[2]</sup>。大型风电场内的大部分风电机组处于上游机组的尾流中, 因此, 尾流损失可观。机组间距较小时, 损失更大, 可达30%<sup>[3]</sup>。尾流还导致风轮下游流场的湍流度增加, 引起下游风电机组疲劳载荷的增加, 影响机组的稳定性与寿命<sup>[4]</sup>。因此, 研究风电场尾流控制技术是当前风能利用的一个重要课题。

从流动结构上看, 尾流是由于风轮旋转扰动产生的一系列切向漩涡, 被来流风带向下游。尾流的影响主要体现在尾流强度、尾流宽度和尾流恢复距离方面。而这三者与来流条件、风电机组的气动性能、运行状态相关。当前尾流控制研究主要是通过控制上游风电机组偏航<sup>[5-6]</sup>, 调整其尾流的方向, 使得在该机组发电量降低较小的情况下, 其下游风电机组全部或部分偏出其尾流影响范围, 从而提高下游风电机组的发电量。此外, 也可通过变桨<sup>[7]</sup>或变速<sup>[8]</sup>, 适当降低上游风电机组的出力, 提高下游风电机组的来流速度, 从而提高下游机组的出力, 使得整体出力最大化。

以上调控手段需要精确获取风电机组尾流与来流条件和机组运行状态的函数关系, 对风轮和叶片进行精

确控制。然而, 早期已建成的大量风电场, 尚不具备精确的单机的转速和偏航控制技术。此外, 机舱测风的精度有限, 偏航控制误差较大, 限制了以上调控技术的实际应用。相对偏航、变速等手段, 风电机组的启停调度是最简单、易实现的控制方式。对于风电机组排布较为密集的风电场, 此方法具有降低尾流、提高整场发电量的优化潜力。当前, 国内外尚未见通过机组启停调度优化全场发电量的相关研究。因此, 本文拟通过数值模拟和风电场现场实验对基于风电机组启停调度的尾流控制方法的可行性进行研究。

为了能够对方法进行有效验证, 首先以有详细运行数据的典型风电场——Horns Rev 风电场为例, 研究启停调控方法的可行性。然后以中国北方某实际风电场为例进行实际应用研究, 验证其有效性。

## 1 尾流模拟方法

尾流优化控制方法的核心是风电机组尾流评估。当前, 常用的风电机组尾流评估方法主要有3类<sup>[3]</sup>: 1) 半经验模型(简称尾流模型), 如 Jensen 模型、Larsen 模型等<sup>[9]</sup>。尾流模型计算量小, 适合工程计算。尾流模型一般适用于远尾流的计算。2) 基于涡尾迹方法, 如固定尾迹和自由尾迹方法, 适合近尾流的模拟。随着尾迹距离的增加, 其计算误差增大, 因此一般不适用于远尾迹<sup>[10]</sup>。3) 计算流体力学方法(CFD)。采用制动盘模型<sup>[11-12]</sup>或风轮模型, 通过求解流体力学控制方程, 如雷诺平均的 NS 方程, 计算风轮绕流。该方法对近尾

流和远尾流都适用,但其计算量较大,目前还难以在工程中应用<sup>[13]</sup>。本文主要研究机组启停优化控制对风电场发电量的影响,并不研究尾流的流动细节,因此尾流计算方法采用尾流模型。

### 1.1 尾流模型

本文对尾流效应的模拟基于 Jensen 尾流模型。Jensen 模型是工程中使用最广泛的尾流模型,由丹麦 Risø 国家实验室的 N.O. Jensen 于 1983 年提出<sup>[14]</sup>,之后进行了进一步改进<sup>[15]</sup>。该模型为一维模型,示意图如图 1 所示。图中,  $v_0$  为来流风速,  $u$  为风轮平面处的风速,  $v$  是风力机下游距离  $x$  位置的轮毂高度处风速。  $r_0$  为风力机叶轮半径,  $r$  为风力机下游距离  $x$  位置的尾流半径。

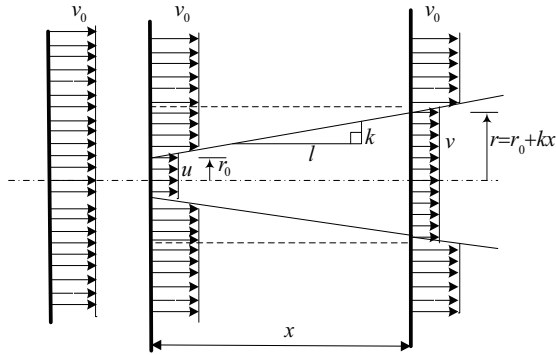


图 1 Jensen 模型示意图

Fig. 1 Jensen wake model

该尾流模型做了以下假设:

1) 尾流场横截面的初始直径为风力发电机组叶轮直径;

2) 尾流场横截面半径呈线性增长;

3) 尾流场横截面上的速度均匀分布。

根据第 2 点假设,尾流半径与风力机下游距离  $x$  存在以下关系:

$$r = r_0 + kx \quad (1)$$

根据动量定理,假设风电机组速度的轴向诱导因子为  $a$ ,则风轮处的风速为:

$$u = v(1 - a) \quad (2)$$

如图 1 所示,控制体满足质量守恒定律,可得式(3):

$$\frac{v}{v_0} = 1 - \frac{2a}{\left(1 + \frac{kx}{r_0}\right)^2} \quad (3)$$

轴向诱导因子  $a$  与推力系数  $C_T$  之间存在如式(4)的关系式:

$$a = (1 - \sqrt{1 - C_T})/2 \quad (4)$$

故风轮处的风速  $u$  可表示如式(5):

$$u = \frac{v}{v_0} = 1 - \frac{1 - \sqrt{C_T}}{\left(1 + \frac{kx}{r_0}\right)^2} \quad (5)$$

式中,  $k$  ——速度恢复系数。根据 Barthlmie 等的建议,陆地风电场可以取较大,如 0.075<sup>[16]</sup>。对于海上风电场和平坦地形风电场,其速度恢复慢,  $k$  可以取 0.05 或 0.04。在本文中,  $k$  的取值通过全场发电量的运行数据进行验证获得。需要注意的是推力系数  $C_T$  随风速为变化值,可根据机组推力曲线获得。

### 1.2 尾流遮挡模型

以上尾流模型仅考虑上下游风电机组轮毂高度位于同一高度的情况,因此仅适用于平坦地形。对于地形高低起伏的风电场,或者当来流方向不在上下游风电机组串列方向时,下游风电机组可能处于上游风电机组的部分尾流区域中。因此,需进一步考虑部分尾流的影响,即所谓的尾流遮挡模型。图 2 给出了尾流与下游风电机组风轮部分重叠的示意图。其中  $A$  为上游风电机组尾流在下游风电机组位置处的覆盖面积,  $B$  为下游风电机组风轮旋转平面,重叠部分为  $C$ 。

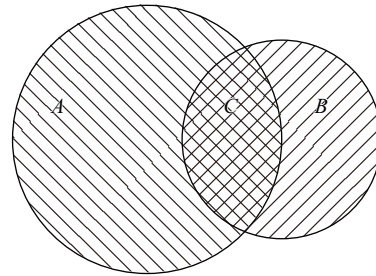


图 2 尾流与下游风轮部分相交

Fig. 2 Partial coverage between wake and downstream wind turbine rotor

Lissaman<sup>[17]</sup>提出采用尾流遮挡面积作为修正权值,并被广泛使用,如式(6)所示。

$$\frac{v}{v_0} = \left[ 1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{\left(1 + \frac{kx}{r_0}\right)^2} \right] \frac{A_C}{A_B} \quad (6)$$

### 1.3 尾流叠加模型

大型风电场内风电机组的数量较多。为了充分利用土地,风电机组之间的距离在串列方向一般在 5~7 倍风轮直径范围,在平行方向一般为 3~5 倍风轮直径范围。因此,下游风电机组往往处于上游多台风电机组

的尾流叠加区域。尾流叠加区域内的计算方法包括几何叠加法、线性叠加法、能量平衡法和平方和法<sup>[18]</sup>。本文采用平方和法。

$$\left(1 - \frac{v_i}{v_0}\right)^2 = \sum \left(1 - \frac{v_{ij}}{v_j}\right)^2 \quad (7)$$

式中,  $v_0$ ——来流风速, m/s;  $v_{ij}$ ——风电机组  $i$  上游存在风电机组  $j$  时的风轮前风速, m/s;  $v_j$ ——风电机组  $j$  的风轮前风速, m/s。以上尾流计算模型采用 Fortran 语言编程实现。

## 2 典型风电场验证分析

### 2.1 风电场尾流分析

丹麦 Horns Rev 海上风电场是世界上首座大型海上风电场, 具有丰富的运行数据积累, 因此得到广泛研究, 可作为标准算例进行方法验证<sup>[17]</sup>。

Horns Rev 风电场共有 80 台 Vestas V80 型风电机组, 单机容量 2 MW, 风轮直径  $D$  为 80 m, 轮毂高度  $H$  为 70 m。80 台风电机组呈 8 行 10 列排列, 各行列机组之间的间距为  $7D$ , 东北方向的间距为  $10.4D$ , 东南方向的间距为  $9.4D$ 。机组排列位置图如图 3 所示。主流风向为西向东。

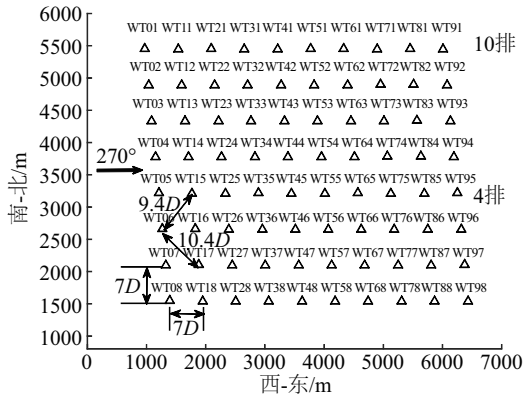


图3 Horns Rev 风电场机组排布模型

Fig. 3 Layout of Horns Rev wind farm

首先对尾流模型中的速度恢复系数  $k$  的取值进行验证。以第 4 行风电机组尾流。根据 Horns Rev 风电场测风数据, 10 min 平均的来流风向为正态分布<sup>[19]</sup>。本文采用来流风向为  $270^\circ$ , 平均风速为 8 m/s。

图 4 给出了各风电机组的功率。横坐标为机组所在的列, 纵坐标为根据第 1 列风电机组功率进行的归一化功率。图中, 实心方块表示风电场实际运行的测量数据; 空心方块为本文计算结果, 其中  $k$  取 0.075; 空心上三角为本文取  $k=0.040$  的结果; 空心圆点

为文献[19]采用改进 Jensen 模型的计算结果, 其  $k$  取 0.040。由计算结果与实验结果对比可看出, 对于  $k$  取 0.040, Jensen 模型均高估了尾流损失, 后排风电机组的功率明显小于实际运行时的功率。一方面原因是由于 Jensen 模型为线性模型, 尾流恢复速度完全由  $k$  控制。 $k$  取 0.04, 低估了速度恢复。另一方面是实验数据中, 来流方向为服从高斯分布的随机数, 不完全为  $270^\circ$ 。文献[19]对来流风向在  $\pm 2.5^\circ$  范围内进行平均, 计算得到的风轮后速度有一定提高, 但其曲线较为平坦。本文取  $k=0.075$  时, Jensen 模型结果与实测结果非常接近, 曲线变化趋势也比  $k=0.040$  的曲线陡峭, 最大误差在第 4 列的风电机组, 为 8.5%。 $k$  取 0.040 比  $k$  取 0.075 时的尾流损失增加了约 40%。

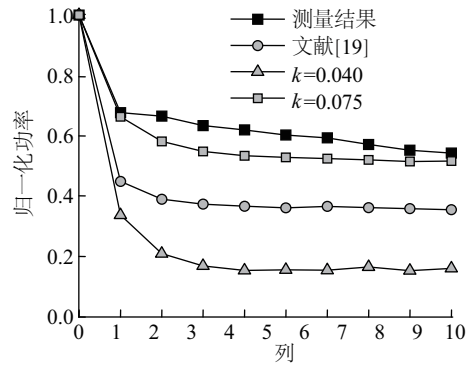


图4 尾流模型参数  $k$  验证

Fig. 4 Verification of  $k$  for wake model

### 2.2 风电机组启停特性

由于主流风向与风电机组串列方向相同, 为了计算方便, 仍取该风电场的第 4 排风电机组为例进行研究。图 5 给出了依次停第 1~7 台风电机组时, 10 台风电机组总功率的变化。横坐标为所停风电机组所在的列, 0 表示不停机, 1 表示停第 1 列机组。纵坐标为归一化的所有机组总功率。由图 5 可看出, 如果停第 1 台机组, 显然总功率会下降较大, 此方案可排除。依次停第 2~7 台, 总功率均呈先上升后下降的趋势, 在停第 4 或第 5 台时出现最大值。不同  $k$  对应不同的最优风电机组序号,  $k$  取小值时, 最优风电机组越靠前。当  $k$  取 0.075 时, 停第 5 台, 总发电量对应最大值, 但其最大值仍略小于 1, 说明, 停机后下游机组提高的总功率不足以弥补停机损失的功率, 即当尾流恢复系数较大时, 停机控制不能起到优化出力的作用。当  $k$  小于 0.06 时, 停机后的全场最大功率大于 1, 说明停机后下游机组提高的总功率大于停机所损失的功率, 即全场出力得到提升。当  $k$  为 0.04 时, 停第 4 台机组, 全场功率比未停机时功率



增加 5%, 表明此时停机优化控制具有提高风电场整场出力的潜力。

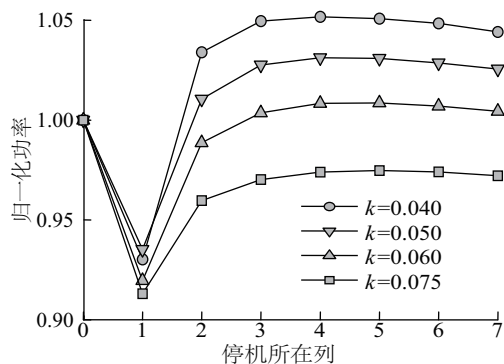


图5 不同停机策略的发电量比较

Fig. 5 Comparison of power generation using different stop control strategy

由于主流风向与风电机组串列方向相同,且风电机组之间的纵向间距达到 7 倍风轮直径。风电机组对下游不在串列方向的其他行机组的尾流影响较小。采用 8 行 10 列的整场模型,进行相同的停机实验,结论与单排实验结果相同,在此不再赘述。

### 3 实际风电场的机组启停控制

#### 3.1 风电场与风电机组简介

以中国北方的某实际风电场为例进行控制尾流的停机仿真计算和实验验证。该风电场位于吉林省西北部,全场海拔 170~220 m,地形起伏不大。主流风向为西北风向,次主流风向为西南风向,10 m 高年平均风速 4.65 m/s。一、二期建设共采用 236 台 850 kW 水平轴风电机组,图 6 为风电机组布机位置图。风轮直径 58 m,额定风速 13 m/s。由于该风电场建设较早,占地面积较小,风电机组排布相对密集。尤其是一、二期风

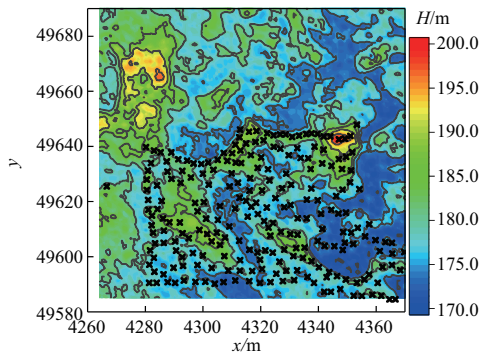


图6 某风电场布机位置

Fig. 6 Layout of a certain wind farm

电场内存在较多的上下游风电机组在主风向和次主风向上间距小于 5 倍风轮直径的情况,局部尾流损失相对较大。

#### 3.2 尾流损失分析

对该风电场连续 3 a 的运行数据分析可得,一期和二期的尾流损失分别为 11.05% 和 11.48%。二期的尾流损失略高于一期。其中 320° 方向的尾流损失高达 22.1%。因此,以 320°±15° 扇区为例进行研究。

以风电场主流向上游测风塔一年的测风数据作为输入条件,采用尾流模型对风电场的年发电量进行模拟。根据运行数据中的发电量,对尾流模型中的  $k$  值进行调整,在  $k=0.010$  时,计算获得的年发电量与运行数据误差约为 1%。因此对于实际风电场的尾流控制模拟采用  $k=0.010$ 。根据 2.2 节的结论,具备出力优化的条件。由于此风电场地形起伏不大,且风电机组排布距离较近,因此主流向下的尾流损失较大。

#### 3.3 典型机位停机实验验证

实验风电场建设时间较早,目前不具备单台机组独立控制条件。同时考虑到实验会对发电量造成损失,不具备现场大面积停机的条件。因此,选取典型机位进行区域实验验证。

在 3.1 节中计算获得各台机组在主流向下的尾流损失,按损失进行排序,同时结合风电机组的相对位置,筛选出两组试验机组,其机组相对位置如图 7。实验的 5 台机组位于主流的串列方向,且间距较小,均在 5D 左右。

实验 1: 停 A008, 比较停机后 A007 与 A006 的总功率与停机前 A006、A007 和 A008 这 3 台机组在相同平均风速下的总功率。

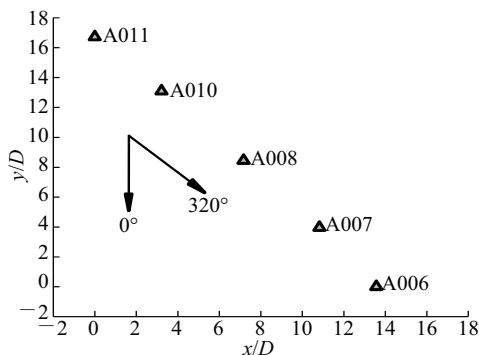


图7 实验机组相对位置

Fig. 7 Relative positions of wind turbines in experiments

实验 2: 停 A011, 比较停机后 A007~A010 的总功率与停机前 5 台机组在相同平均风速下的总功率。

停机时间长短受到实际风电场运行的限制,在主风向下,风速较为平稳的时段,分别将 A011 风电机组停机 2 h,将 A008 停机 2 h。考虑到风速在上下游机组间传递需要一定时间,下游机组功率的统计具有滞后性,因此在停机运行数据中,选择 10 min 内风速波动不超过 10% 的时间段,进行 10 min 的时间平均。

在实验 1 中:经过数据筛选,获得 3 个平均风速下的发电量,如表 1 所示。风速为 A008 风力机的机舱风速,实验功率采用 6.11m/s 下未停机的功率进行无量纲化,其定义为:

$$\varepsilon = \frac{P_i - P}{P} \times 100\% \quad (8)$$

式中,  $P_i$  ——停机后的功率;  $P$  ——未停机的功率。

表 1 实验 1 的归一化功率对比

Table 1 Comparison of power generation for experiment 1

对比项	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		
	6.07	6.11	6.39
未停 A008	0.7845	1	1.1130
停 A008	0.9066	1.0684	1.1894
$\varepsilon/\%$	15.55	6.84	6.87

在实验 2 中:经过数据筛选,获得 3 个平均风速下的发电量,比较如表 2 所示。风速采用 A011 的机舱风速,功率采用 6.33 m/s 下的未停机的功率进行无量纲化。

表 2 实验 2 的归一化功率对比

Table 2 Comparison of power generation for experiment 2

对比项	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$			
	5.77	5.92	6.22	6.33
未停 A011	0.561	0.652	0.776	1.0
停 A011	0.662	0.855	0.998	1.033
$\varepsilon/\%$	18.0	31.2	28.6	3.3

采用 3.2 节根据全场运行数据调整后的尾流模型,分别计算停机实验 1 的 6.11m/s 风速和停机实验 2 的 6.33 m/s 风速情况,功率变化情况如表 3 所示。

表 3 计算的功率变化

Table 3 Computational results of power variation

实验	风速/ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\varepsilon/\%$
1	6.11	0.82
2	6.33	1.72

根据实验结果,2 组实验在停典型机位机组情况下

均提高了发电功率,验证了启停控制的有效性。低风速下的提高量高于高风速的提高量。对本文所研究算例,在约 5.9 m/s 风速提高最明显。与计算结果比较,实验结果提高效果明显高于计算结果。其原因有两方面。1)实验中采用停机的风电机组的机舱风速作为计算来流条件。而该风电机组处于上游风电机组的尾流区中。停机后,其下游风电机组的来流速度会进一步恢复。因此,对于下游机组的来流风速大于计算的来流风速。进而提升的功率较计算结果更大。2)在实际运行中,当机组来流风速小于 3 m/s 时,风电机组达到切出风速,其功率降为 0,进一步增加了尾流的影响。这也是在实际风电场中  $k$  值偏低的原因。而在计算中未考虑这部分影响,因此提升效果偏小。

## 4 结 论

本文基于 Jensen 尾流模型研究通过风电机组的启停调度减小风电场尾流损失的方法。通过典型风电场的验证,确认了方法的有效性 & 模型参数对优化效果的影响。针对实际地形风电场,在局部范围内展开验证试验。获得结论如下:

1)对于实际地形风电场,其速度恢复系数  $k$  应根据实际运行数据进行校核。当实际风电场内风电机组的排布较密时,  $k$  的取值远小于经验推荐值。当尾流恢复系数  $k$  小于 0.06 时,控制典型机位的机组停机可增加全场发电量。

2)仅根据地形进行风电场的布机,并未实现风电场发电量的最大化。对新建风电场进行优化布机时,应结合风电机组的控制规律进行布机优化。

本文在实际风电场的验证试验初步针对局部区域展开。下一步将结合优化算法对风电场全场进行全场优化和验证试验。

## [参考文献]

- [1] HUSIEN W. Effect of the wake behind wind rotor on optimum energy output of wind farms[J]. Renewable energy, 2013, 49(1): 128-132.
- [2] LONGATT F G. Wake effect in wind farm performance [J]. Renewable Energy, 2012, 39(1): 329-338.
- [3] VERMEER L J, SORENSEN J N, CRESPO A. Wind turbine wake aerodynamics[J]. Progress in aerospace sciences, 2003, 39(6-7): 467-510.
- [4] 陈坤, 贺德馨. 风力机尾流数学模型及尾流对风力机性能影响的研究[J]. 流体力学实验与测量, 2003, 17

- (1): 84-87.
- CHEN K, HE D X. The study for the wake model of wind turbine and the wake effects on the performance of wind turbine[J]. *Experiments and measurements in fluid mechanics*, 2003, 17(1): 84-87.
- [5] 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[J]. *Wind energy*, 2014, 19(1): 95-114.
- [6] 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.
- [7] LEE J, SON E, HWANG B, et al. Blade pitch angle control for aerodynamic performance optimization of a wind farm[J]. *Renewable energy*, 2013, 54(6): 124-130.
- [8] 舒进, 郝治国, 张保会, 等. 风电场的集群功率优化控制[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(34): 10-19.
- SHU J, HAO Z G, ZHANG B H, et al. Wind farm coordinated control for power optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(34): 10-19.
- [9] 曹娜, 于群, 王伟胜, 等. 风电场尾流效应模型研究[J]. *太阳能学报*, 2016, 37(1): 222-229.
- CAO N, YU Q, WANG WS, et al. Research on wake effect model of wind farm[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2016, 37(1): 222-229.
- [10] VAN Kuik G A M. On the generation of velocity by force fields in rotor-and actuator flows[J]. *Renewable energy*, 2014, 70(5): 124-128.
- [11] 沈翔, 王同光, 钟伟. 风力机远尾流速度建模[J]. *太阳能学报*, 2014, 35(3): 469-474.
- SHEN X, WANG T G, ZHONG W. Modelling of the velocity profile of wind turbine far wake[J]. *Acta energiae solaris sinica*, 2014, 35(3): 469-474.
- [12] 卞凤娇, 徐宇, 王强, 等. 改进致动面模型的多风力机尾流研究[J]. *工程热物理学报*, 2015, 36(6): 1223-1227.
- BIAN F J, XU Y, WANG Q, et al. Wake study of multi wind turbines based on improved actuator surface model[J]. *Journal of engineering thermophysics*, 2015, 36(6): 1223-1227.
- [13] SANDERSE B, VAN DER PIJL S P, KOREN B. Review of computational fluid dynamics for wind turbine wake aerodynamics[J]. *Wind energy*, 2011, 14(7): 799-819.
- [14] JENSEN N O. A note on wind generator interaction [R]. Risø-M-2411, 1983.
- [15] KATIC I, HOJSTRUP J, JENSEN N O. A simple model for cluster efficiency [C]//European Wind Energy Conference, Rome: Ricardo, 1986: 407-410.
- [16] BARTHELMIE R J, FOLKERTS L, LARSEN G C, et al. Comparison of wake model simulations with offshore wind turbine wake profiles measured by lidar[J]. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, 2006, 23(7): 888-901.
- [17] LISSAMAN P. Energy effectiveness of arbitrary, array of wind turbines[R]. AIAA paper 79-0114, 1979.
- [18] RENKEMA D J. Validation of wind turbine wake models [D]. Netherlands: Delft University of Technology, 2007.
- [19] GAUMOND M, RÉTHORÉ P- E, OTT S, et al. Evaluation of the wind direction uncertainty and its impact on wake modeling at the Horns Rev offshore wind farm[J]. *Wind energy*, 2014, 17(8): 1169-1174.

## OPTIMIZED START AND STOP CONTROL OF WIND TURBINES CONSIDERING WAKE EFFECT

Yin Zuoming<sup>1</sup>, Wang Xiaodong<sup>2</sup>, Guan Hong<sup>1</sup>, Liu Wenxiu<sup>1</sup>, Liu Manchuan<sup>1</sup>, Teng Yihai<sup>1</sup>

(1. Jilin Longyuan Wind Power Co., Ltd., Changchun 130022, China; 2. Key Laboratory of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** This paper investigates the effect of the optimized control strategy of the wind turbine start and stop on the wake effect and power generation in a typical wind farm using wake model simulations. It is found that the total power generation of the whole wind farm can be increased through stopping certain wind turbines when the velocity recovering coefficient is less than 0.06. Outfield experiments were performed on an onshore wind farm in North of China. The experimental results verify the effectiveness of the control strategy. Under the prevailing wind direction, the power generation of a local group of wind turbines is increased by the optimized control of the upstream wind turbine.

**Keywords:** wind farm; wind turbine; wake; control; complex terrain; outfield experiment