

文章编号:0254-0096(2018)02-0359-10

## 考虑尾流效应的风电场优化控制技术研究

顾波<sup>1</sup>, 胡昊<sup>1</sup>, 刘永前<sup>2</sup>, 张洋<sup>1</sup>, 康顺<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学, 郑州 450045; 2. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京 102206)

**摘要:** 针对已建风电场, 提出一种考虑尾流效应的风电场优化控制方法, 以减少风电场尾流效应, 提高风电场整体输出功率。研究机组状态参数变化与输出功率、尾流分布间的量化关系, 揭示风电机组状态参数变化与输出功率、尾流分布间的耦合关系; 提出尾流与风轮交汇面积的计算方法, 建立多台风电机组的尾流叠加模型; 以风电场整体输出功率最大为目标函数, 轴向诱导因子为优化参数, 粒子群算法为优化算法, 建立考虑尾流效应的风电场优化控制模型。以丹麦 Horns Rev 风电场为算例进行计算分析, 结果表明: 所提出的考虑尾流效应的风电场优化控制方法能够使风电场整体输出功率增加。

**关键词:** 风电机组; 优化控制; 风电场; 尾流模型; 粒子群算法

**中图分类号:** TK81

**文献标识码:** A

### 0 引言

随着风电的大规模开发利用, 为节约土地资源, 减少投资成本, 通常会将数十台甚至数百台风电机组按照一定的排列方式建设成风电场。大量风电机组被安装在同一风电场内, 使得风电场尾流效应变得越加明显, 直接影响风电场整体输出功率。减少风电场尾流效应, 提高风电场整体输出功率的研究具有很好的经济价值。

尾流是指风经过风轮后产生的连续切向旋涡。大部分风电机组处于上游机组的尾流中, 尾流区风速降低<sup>[1,2]</sup>, 湍流度增加<sup>[3-5]</sup>。风速降低造成尾流区内风电机组发电量损失为 10%~15%<sup>[6]</sup>, 机组间距较小时损失更大, 丹麦 Horns Rev 风电场内某些机组因尾流造成的年发电量损失高达 90%以上<sup>[7]</sup>。为研究风电机组尾流特性, 文献[8,9]提出单台风电机组 MILLY 半经验尾流模型, 该尾流模型的径向尺度和下游截面的速度分布是下游位置的函数。文献[10,11]基于理想流体力学积分方程, 平均化了尾流区内的速度分布, 提出 Jensen 尾流模型。文献[12~14]结合试验数据, 提出基于涡粘模型的风电机组尾流三维简化模型, 与现场测量结果吻合较好。对于风电机组输出功率的控制, 主

要采用单台风电机组最大功率跟踪控制策略<sup>[15-17]</sup>。采用单机最大功率控制策略未考虑风电机组之间的尾流效应, 致使下游机组因尾流效应而产生过大的风速衰减, 造成风电场整体输出功率并非最大<sup>[18]</sup>。为提高风电场整体输出功率, 文献[19,20]基于 WAKEFARM 尾流计算模型, 提出一种考虑尾流效应的风电场优化控制方法来提高风电场整体输出功率; 该优化控制方法通过调整风电机组轴向方向偏离来流风向, 使风电场尾流损失减少, 风电场整体输出功率提高; 计算结果表明, 通过合理优化风电机组轴向方向, 可使风电场整体输出功率增加 13%; 但 Schepers 等<sup>[19]</sup>的研究未考虑风电机组偏航所造成的载荷增加。通过合理分配各风电机组的输出功率, 减少风电场尾流效应, 可使风电机组寿命增加 17%<sup>[21-24]</sup>。文献[25,26]提出一种模型自由方法来减少风电场尾流效应, 提高风电场整体输出功率; 计算结果表明该方法可使风电场整体输出功率增加 25%; 但该方法的收敛时间达数十小时, 无法满足风电场实时控制的要求。风速和风向是影响尾流分布的主要因素, 在风电场优化控制过程中考虑风速风向因素, 能够显著减少尾流效应, 提高风电场整体输出功率<sup>[27,28]</sup>。文献[29]提出一种基于尾流效应的海上风电场有功出力优化方法, 仿真结

收稿日期: 2016-02-22

基金项目: 河南省重点科技攻关“风电机组间尾流干涉关键技术研究”(152102210117)

通信作者: 顾波(1982—), 男, 博士、副教授, 主要从事风电系统优化控制理论与技术方面的研究。gb19820915@163.com

果表明,该优化方法能够使风电场有功输出提高 2.32%。文献[30]提出一种风电场尾流分布快速计算方法,该方法能够准确计算不同来流风向、风速下风电场的尾流分布,为考虑尾流效应的风电场优化控制方法提供支撑。Knudsen 等<sup>[31]</sup>对考虑尾流效应的风电场优化控制技术进行了综述,为考虑尾流效应的风电场优化控制技术研究指明了方向。

上述作者对考虑尾流效应的风电场优化控制方法进行了初步探究,并取得了部分研究成果。然而,考虑尾流效应的风电场优化控制技术仍有大量的研究任务尚未解决,比如缺乏能够准确、快速计算风电场尾流分布,且满足控制系统实时性要求的风电场尾流分布快速计算模型;需进一步量化风电机组运行状态参数与尾流分布间的耦合关系;需进一步探索高维数、非线性、多参数耦合的风电场优化控制方法,提高风电场优化控制的实时性和准确性。

基于当前的研究现状,本文提出一种考虑尾流效应的风电场优化控制方法,用于减小风电场尾流效应,提高风电场整体输出功率。首先研究风电机组状态参数变化与输出功率、尾流分布间的量化关系,揭示风电机组状态参数变化与输出功率、尾流分布间的耦合关系;其次,提出尾流与风轮交汇面积的计算方法,并建立多台风电机组尾流的叠加模型;以风电场整体输出功率最大为目标函数,轴向诱导因子为优化参数,粒子群算法为优化算法,建立了考虑尾流效应的风电场优化控制模型,并以丹麦 Horns Rev 风电场为算例进行计算分析。

## 1 机组运行状态与尾流分布关系

风电机组可以通过控制系统调整机组的旋转速度和桨距角,从而改变机组的运行状态。当风电机组的运行状态发生变化时,机组的输出功率及尾流分布也相应发生变化,本节将对风电机组运行状态、输出功率及尾流分布间的耦合关系进行研究。

### 1.1 尾流与推力系数的关系

常用的风电机组尾流计算模型,包括 Jensen 模型、Larsen 模型及 Frandsen 模型<sup>[32-35]</sup>,这 3 个模型均可表示为推力系数的表达式,且在计算尾流速度分布时的计算结果差别不大。为便于问题的分析,本

文以 Jensen 模型为对象进行研究,Jensen 模型的计算公式如式(1)和式(2)所示。

$$D_{w,i} = D(1 + 2ks) \quad (1)$$

$$u_i = u_0 \left[ 1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_{T,i}}}{(1 + 2ks)^2} \right] \quad (2)$$

式中, $D_{w,i}$ ——风电机组  $i$  下游  $s$  倍风轮直径距离处的尾流直径; $D$ ——风轮直径; $u_i$ ——风电机组  $i$  下游  $s$  倍风轮直径距离处的尾流风速; $u_0$ ——无穷远处来流风速; $C_{T,i}$ ——风电机组  $i$  的推力系数; $k$ ——尾流衰变常数。

在 Jensen 模型中,衰变常数  $k$ 、风轮直径  $D$ 、无穷远处来流风速  $u_0$  及风轮后的距离  $s$  在计算过程中为常数。由式(2)可知,风电机组  $i$  下游  $s$  倍风轮直径距离处的尾流风速仅与推力系数  $C_{T,i}$  有关,改变风电机组的推力系数,即可改变风电机组下游的尾流风速。

图 1 是根据 Jensen 模型计算得到的尾流速度  $u_i$  与推力系数  $C_{T,i}$  之间的关系图。在计算过程中,风轮直径  $D$  为 80 m,衰变系数  $k$  为 0.08,风轮下风向距离  $s$  为 7,来流速度  $u_0$  为 9 m/s。

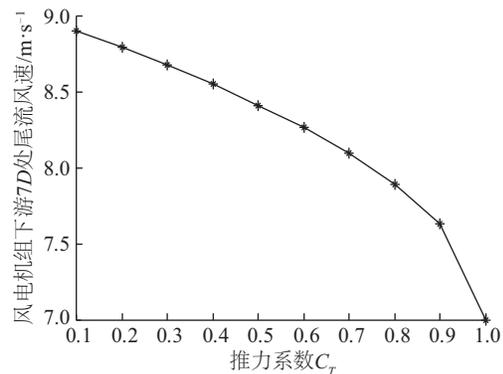


图 1 尾流风速与推力系数之间关系

Fig. 1 Relationship between wake speed and thrust coefficient

由图 1 可知,风电机组下游尾流风速随着推力系数的增加不断降低,当推力系数等于 1 时,表示风轮变为实心圆盘,此时尾流速度达到最小值。对于实际运行的风电机组,其推力系数一般小于 1。

### 1.2 推力系数、诱导因子及输出功率间的关系

根据风力机空气动力学原理,作用在风电机组上的推力  $T$  可表示为式(3)。

$$T = \frac{1}{2} \rho A_1 u_0^2 C_T \quad (3)$$

式中,  $\rho$  ——空气密度;  $A_1$  ——风轮圆盘面积;  $C_T$  ——风力机的推力系数。轴向诱导因子  $a$  与推力系数  $C_T$  间的数量关系可由式(4)和式(5)进行计算。

$$C_T = 4a(1-a) \quad (4)$$

$$a = \frac{1 \pm \sqrt{1-C_T}}{2} \quad (5)$$

在风电机组实际运行中,轴向诱导因子  $a$  一般小于 0.5,所以式(5)中的“+”不存在。根据能量守恒定理,作用在风轮圆盘上的功率( $P$ )等于动能的减少量,其关系如式(6)所示。

$$P = \frac{1}{2} \rho u A_1 (u_0^2 - u_1^2) \quad (6)$$

式中,  $u_1$  ——距离风电机组下游  $x$  处的尾流风速。

将式(4)和式(5)代入式(6)中进行计算,可得式(7)。

$$\begin{aligned} P &= 2\rho u_0^3 a(1-a)^2 A_1 \\ &= 2\rho u_0^3 \frac{1-\sqrt{1-C_T}}{2} \left(1 - \frac{1-\sqrt{1-C_T}}{2}\right)^2 A_1 \end{aligned} \quad (7)$$

由式(7)可得风能利用系数( $C_p$ )的表达式如式(8)所示。

$$C_p = 4a(1-a)^2 \quad (8)$$

风电机组推力系数  $C_T$  与轴向诱导因子  $a$  的关系如图 2 所示。在图 2 中,推力系数  $C_T$  随着轴向诱导因子  $a$  的增大而增大。

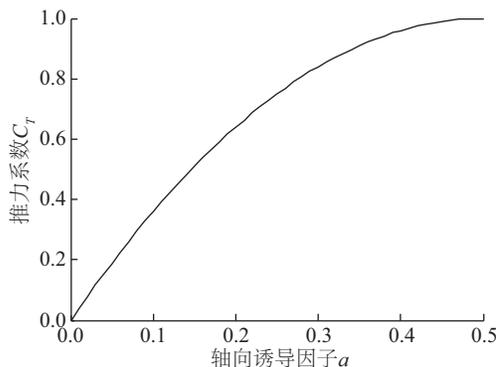


图2 推力系数与诱导因子的关系

Fig. 2 Relationship between thrust coefficient and axial induction factor

风电机组推力系数  $C_T$  与输出功率  $P$  之间的对应关系如图 3 所示。在图 3 中,输出功率  $P$  随推力系数  $C_T$  的增加而增大,在推力系数约等于 0.91 时达到最大值,这与大型风电机组设计运行的最优工

况相符合。

由图 1、图 2 和图 3 可知,尾流风速随着轴向诱导因子  $a$  或推力系数  $C_T$  的增加而减小,风电机组输出功率  $P$  随轴向诱导因子  $a$  或推力系数  $C_T$  的增大而增加。因此,可在尾流风速减小和输出功率增加之间找到一组最佳轴向诱导因子  $\{a_i | i=1, 2, \dots, n\}$ ,使风电场尾流效应减小,整体输出功率增加。

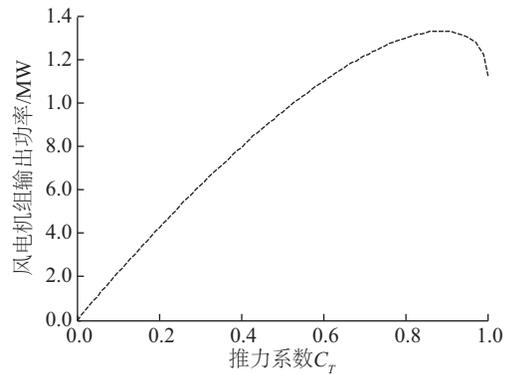


图3 推力系数与输出功率的对应关系

Fig. 3 Relationship between thrust coefficient and output power

## 2 尾流叠加计算方法

对于大型风电场,风电场中机组台数较多,经常会发生多台风电机组尾流干涉现象,如图 4 所示。

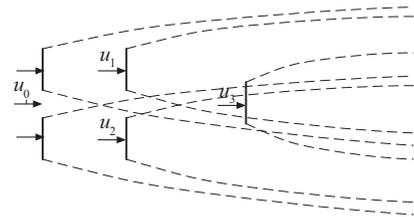


图4 风电场尾流干涉现象

Fig. 4 Wake interference phenomenon of wind farm

对于多台风电机组尾流干涉现象,如何准确计算尾流干涉区域的风速分布,成为尾流研究的重点和难点内容之一。为此,本节提出一种上游风电机组  $j$  尾流与下游风电机组  $i$  风轮交汇面积  $A_{j,i}$  的计算方法。

尾流和风轮交汇面积可分为 2 种情况,如图 5 所示,图中  $o_1$  为上游风电机组  $j$  的尾流区域中心,  $o_2$  为下游风电机组  $i$  的风轮中心,  $r_1$  为尾流区域的

半径,  $r_2$  为风轮半径,  $d$  为尾流区域中心到风轮中心的距离,  $\alpha$  为尾流区域和风轮相交点到尾流区域中心点的直线与  $d$  的夹角、 $\beta$  为尾流区域和风轮相交点到风轮中心点的直线与  $d$  的夹角。

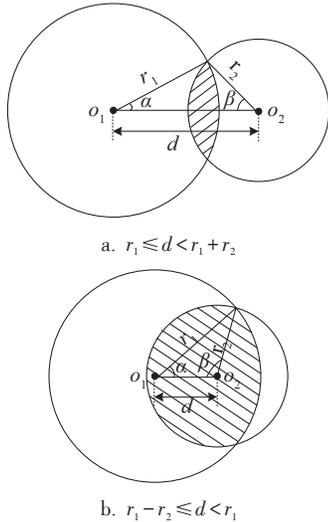


图5 尾流与风轮部分相交

Fig. 5 Intersection area between wake and wind turbine

在图 5 中, 阴影部分为尾流与风轮的交汇区域, 对于图中交汇区域面积  $A_{j,i}$  的大小可根据式(9)进行计算。

$$A_{j,i} = \arccos\left(\frac{r_1^2 + d^2 - r_2^2}{2 \cdot r_1 \cdot d}\right) \cdot r_1^2 + \arccos\left(\frac{r_2^2 + d^2 - r_1^2}{2 \cdot r_2 \cdot d}\right) \cdot r_2^2 - \sin\left[\arccos\left(\frac{r_1^2 + d^2 - r_2^2}{2 \cdot r_1 \cdot d}\right)\right] \cdot r_1 \cdot d \quad (9)$$

根据式(1)和式(2)可以计算上游风电机组  $j$  在下游风电机组  $i$  处的尾流风速  $u_{j,i}$ 。

$$u_{j,i} = u_j \left[ 1 - \frac{1 - \sqrt{1 - C_{Tj}}}{(1 + 2ks)^2} \right] \quad (10)$$

式中,  $u_{j,i}$  ——上游风电机组  $j$  在下游风电机组  $i$  处的尾流风速;  $u_j$  ——风电机组  $j$  的来流风速;  $C_{Tj}$  ——风电机组  $j$  的推力系数。

由式(10)可知, 下游风电机组  $i$  处的风速仅与上游风电机组  $j$  的推力系数  $C_{Tj}$  有关, 改变上游风电机组的推力系数, 即可改变下游风电机组的来流风速。

当风电机组  $i$  前面有  $i-1$  台风电机组, 无穷远处来流风速为  $u_0$  时, 风电机组  $i$  处风速和面积交汇权值的计算公式如式(11)和式(12)所示。

$$u_i = \sqrt{u_0^2 + \sum_{j=1}^{i-1} \alpha_{j,i} (u_{j,i}^2 - u_j^2)} \quad (11)$$

$$\alpha_{j,i} = \frac{4A_{j,i}}{\pi D^2} \quad (12)$$

式中,  $\alpha_{j,i}$  ——上游风电机组  $j$  尾流面积与下游风电机组  $i$  风轮面积交汇的权值;  $A_{j,i}$  ——上游风电机组  $j$  尾流面积与下游风电机组  $i$  风轮面积的交汇面积。

根据式(9)即可计算出尾流与风轮的交汇区面积, 接着采用式(11)即可计算上游  $i-1$  台风电机组在下游风电机组  $i$  处的尾流损失。

### 3 基于粒子群的风电场优化控制

Kennedy 和 Eberhart 在 1995 年首次提出了粒子群(PSO)算法<sup>[36,37]</sup>, 用于模仿鸟类觅食的社会学行为。由于 PSO 算法具有算法简单和收敛速度快等特点, 被广泛应用于复杂系统的优化控制过程。PSO 算法的计算过程如图 6 所示。

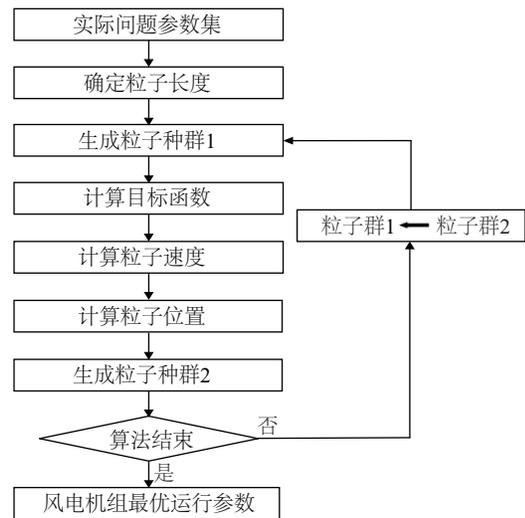


图6 粒子群算法计算过程

Fig. 6 Calculation process of PSO algorithm

为了将 PSO 算法应用于风电场优化控制过程中, 必须确定优化问题的参数集、目标函数和粒子速度, 下面内容将对这些问题进行详细阐述。

#### 1) 实际问题的参数集

从第 1 节的内容可知, 轴向诱导因子  $a$  是连接尾流风速和输出功率的纽带, 轴向诱导因子  $a$  的变

化将直接影响尾流风速和输出功率的变化。因此,在 PSO 算法优化过程中选择轴向诱导因子  $a$  作为 PSO 算法的优化参数。轴向诱导因子  $a$  的变化范围为  $[0.00, 0.33]$ 。

## 2) 目标函数

本文的研究目的是使风电场整体输出功率最大,为此,PSO 算法的目标函数为风电场整体输出功率,目标函数的表达式如式(13)和式(14)。

$$Pow = \sum_{i=1}^n pow_i \quad (13)$$

$$pow_i = 2pu_i^3 a_i (1 - a_i)^2 A_i \quad (14)$$

式中,  $Pow$  —— 风电场整体输出功率;  $n$  —— 风电机组台数;  $pow_i$  —— 第  $i$  台风电机组输出功率;  $u_i$  —— 第  $i$  台风电机组的来流风速;  $a_i$  —— 第  $i$  台风电机组轴向诱导因子。

## 3) 粒子更新速度

粒子的更新速度大小决定着粒子能否较快地寻找到最优解。但是,当粒子更新速度设置得过大,容易造成 PSO 算法的最优解来回波动,难以收敛到最优解位置点;当粒子更新速度设置得过小,PSO 算法容易陷入局部最小点。粒子速度的更新公式如式(15)所示。

$$\begin{cases} V_i(t) = \begin{cases} V_i(t-1) + C_1 rand() (P_i(t-1) - X_i(t-1)) + \\ C_2 rand() (G(t-1) - X_i(t-1)), & |V_i(t)| < V_{max} \\ -V_{max}, & V_i(t) \leq -V_{max} \\ V_{max}, & V_i(t) \geq V_{max} \end{cases} \\ X_i(t) = X_i(t-1) + V_i(t) \end{cases} \quad (15)$$

式中,  $V_i(t)$  —— 第  $i$  个粒子在第  $t$  次迭代过程中的粒子速度;  $C_1$ 、 $C_2$  —— 粒子群的学习因子;  $P_i(t-1)$  —— 第  $i$  个粒子在第  $t-1$  次迭代过程中的最优位置;  $G(t-1)$  —— 粒子群在第  $t-1$  次迭代过程中的最优位置;  $X_i(t-1)$  —— 第  $i$  个粒子在第  $t-1$  次迭代过程中的位置;  $V_{max}$  —— 粒子移动的最大速度。

## 4 算例分析

以丹麦 Horns Rev 风电场为研究对象,对来流风速为 8.5 和 12m/s,来流风向  $270^\circ$  的风况分别进行了计算分析。计算机处理器速度为 1.8 GHz,内存 2 G,运算软件为 Matlab 2011。PSO 算法的迭代次数为 390 次,迭代耗时 50 s,满足风电场实时控制

的需求。

丹麦 Horns Rev 风电场<sup>[38]</sup>共有 80 台风电机组,由 8 行 10 列按照平行四边形排布,行和行、列和列之间的间距为  $7D$ ,东北方向的间距为  $10.4D$ ,东南方向的间距为  $9.4D$ ,风电机组为 Vestas V80,单机容量 2 MW,风轮直径 80 m,轮毂中心高度 70 m,整个风电场排布如图 7 所示。图中,箭头方向表示风速方向,水平带箭头的直线表示风速由西向东流动( $270^\circ$ 方向),倾斜向上的直线表示风速由西南方向向东北方向流动( $222^\circ$ 方向)。

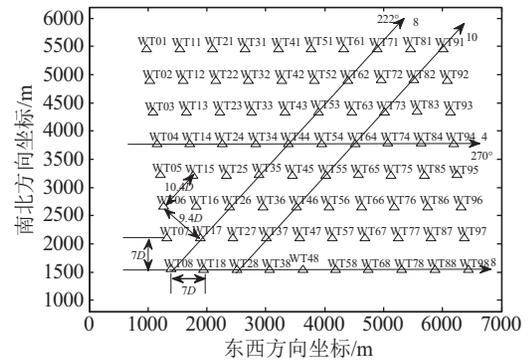


图7 Horns Rev 风电场排布规则

Fig. 7 Horns Rev wind farm layout diagram

图 8 是根据第 1 节的机组尾流模型及第 2 节的尾流叠加模型计算得到的 Horns Rev 风电场第 4 行风电机组处的尾流风速,此刻,来流风速为 8.5 m/s,来流角度为  $270^\circ$ 。

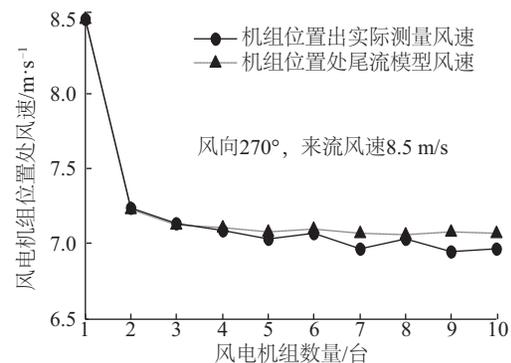


图8 风电场尾流风速分布

Fig. 8 Wind farm wake wind speed distribution

在图 8 中,带三角形的虚线表示尾流模型计算得到的风电机组位置处风速,带圆点的实线表示实际测量的风电机组位置处风速,二者最大差值为 0.14 m/s,表明本文所述的尾流计算方法能够准确描述风电场尾流实际分布。

图 9 是考虑尾流效应的风电场优化控制算法计算结果图。在图中,来流风速为 8.5 m/s,风向为 270°,水平的点直线表示未进行优化控制之前,所有机组的轴向诱导因子  $\alpha$  为 0.33,根据尾流模型计算得到的风电场整体输出功率;实线表示基于粒子群算法的风电场优化控制方法计算得到的风电场整体输出功率。从图中可知,优化后的风电场整体输出功率明显大于优化前的输出功率,优化前输出功率为  $5.12 \times 10^7$  W,优化后输出功率为  $5.63 \times 10^7$  W,优化前后功率相差  $5.1 \times 10^6$  W,优化后风电场整体输出功率提高了 9.96%。由此可见,采用 PSO 算法的风电场优化控制方法能够提高风电场整体输出功率。

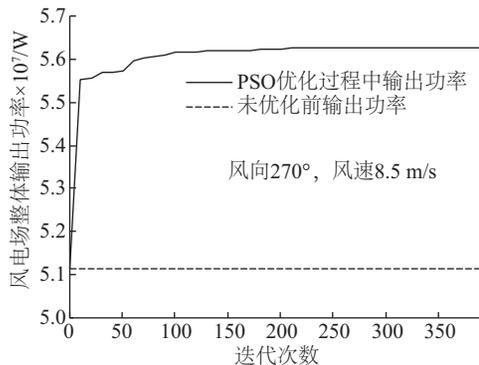


图9 粒子群算法优化控制计算过程

Fig. 9 Optimization control calculation process of PSO algorithm

图 10 为风电场中第 4 行风电机组实际测量风速、优化前尾流模型的计算风速及优化后尾流模型的计算风速对比图。在图 10 中,带圆点实线代表实际测量风速,带三角形虚线代表优化前尾流模型的计算风速,带星号虚线代表优化后尾流模型的计算风速。

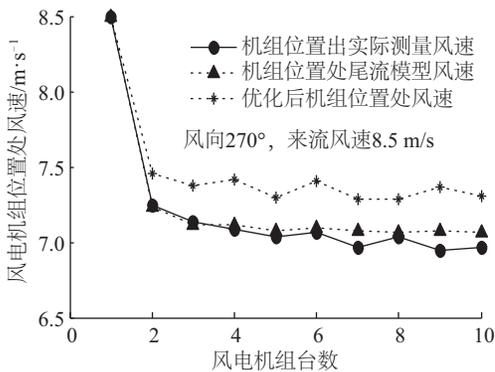


图 10 第4行风电机组风速对比

Fig. 10 Wind speed comparison of the fourth row wind turbines

从图 10 可知,优化后第 4 行的风电机组位置处的风速均大于优化前的风速,证明本文提出的基于 PSO 算法的风电场优化控制方法的合理性和可行性。

图 11 为风向为 270°、风速为 12 m/s 时,基于 PSO 算法的风电场优化控制结果图。图中各曲线的含义如图 9 所示。由图可知,优化后风电场整体输出功率明显大于优化前的输出功率,优化前输出功率为  $1.44 \times 10^8$  W,优化后输出功率为  $1.58 \times 10^8$  W,优化前后功率相差  $1.4 \times 10^7$  W,优化后风电场整体输出功率提高了 9.72%。

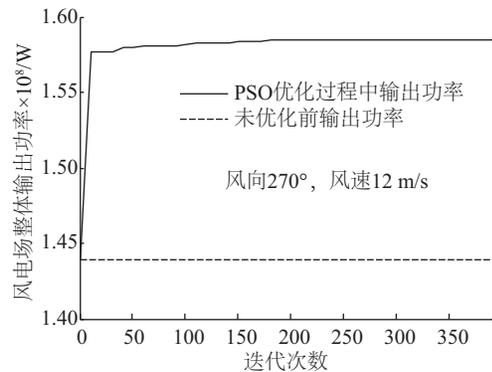


图 11 粒子群算法优化控制计算过程

Fig. 11 Optimization control calculation process of PSO algorithm

由图 9 和图 11 可知,在不同风速下,基于粒子群算法的风电场优化控制方法均能够提高风电场整体输出功率,进一步证明本文提出的基于 PSO 算法的风电场优化控制方法的合理性和可行性。

图 12 为风向 270°、风速 12 m/s 时,风电场中第 4 行风电机组实际测量风速、优化前尾流模型计算风速及优化后尾流模型计算风速对比图。图 12 中各曲线的含义与图 10 相同。由图可见,优化后的

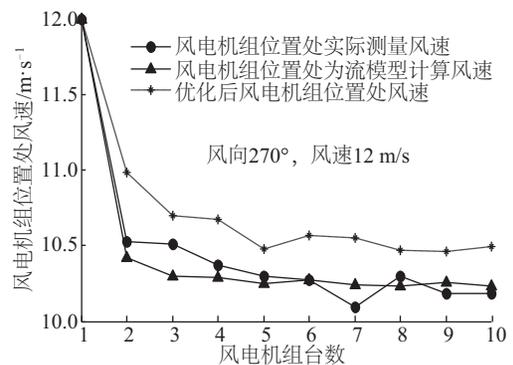


图 12 第4行风电机组风速对比

Fig. 12 Wind speed comparison of the fourth row wind turbines

风电机组位置处风速明显大于优化前风电机组位置处风速。

表 1 是风向为 270°、风速为 8.5 m/s 时风电场

中风电机组优化后的轴向诱导因子。表 1 中,  $T_{ij}$  表示第  $i$  行第  $j$  列的风电机组, 第 1 列表示风电机组的行数, 第 1 行表示风电机组的列数。

表 1 优化后风电机组轴向诱导因子

Table 1 Axial induction factor of wind turbine after optimization

$T_{ij}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.26	0.22	0.26	0.25	0.22	0.23	0.22	0.27	0.22	0.27
2	0.21	0.25	0.19	0.22	0.19	0.20	0.23	0.24	0.19	0.29
3	0.22	0.23	0.25	0.22	0.23	0.24	0.24	0.21	0.24	0.29
4	0.23	0.23	0.21	0.24	0.21	0.24	0.24	0.22	0.23	0.24
5	0.24	0.24	0.23	0.23	0.22	0.26	0.20	0.23	0.21	0.26
6	0.21	0.22	0.23	0.22	0.22	0.23	0.17	0.22	0.21	0.26
7	0.20	0.21	0.21	0.22	0.21	0.23	0.20	0.23	0.26	0.24
8	0.23	0.25	0.19	0.28	0.24	0.23	0.26	0.26	0.24	0.29

从表 1 中可看出, 位于表中最右列的风电机组下游没有其他风电机组, 该列风电机组应该以最大功率跟踪运行, 此时, 风电机组的轴向诱导因子  $a$  应该为 0.33。然而, 优化后的轴向诱导因子  $a$  并未达到 0.33。由此可知, 虽然 PSO 算法在风电场优化控制中取得了不错的效果, 但是仍然没有求解到问题的最优解。出现这种现象的原因, 主要是由于

Horns Rev 风电场由 80 台风电机组构成, 优化参数的解空间维数较高, 且优化参数间存在耦合关系, 使得粒子群算法难以获得最优解。因此, 需要进一步探索高维数、非线性、多参数耦合的风电场优化控制方法。

表 2 是风向为 270°、风速为 12 m/s 时风电场中风电机组优化后的轴向诱导因子。

表 2 优化后风电机组轴向诱导因子

Table 2 Axial induction factor of wind turbine after optimization

$T_{ij}$	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0.27	0.20	0.24	0.24	0.25	0.21	0.23	0.23	0.28	0.26
2	0.26	0.21	0.25	0.25	0.25	0.20	0.22	0.21	0.26	0.24
3	0.23	0.27	0.24	0.21	0.25	0.25	0.24	0.23	0.24	0.28
4	0.23	0.23	0.24	0.22	0.23	0.22	0.20	0.24	0.23	0.28
5	0.26	0.26	0.21	0.22	0.22	0.21	0.26	0.22	0.22	0.25
6	0.23	0.20	0.23	0.23	.22	0.22	0.24	0.22	0.25	0.31
7	0.22	0.23	0.20	0.22	.22	0.20	0.25	0.23	0.25	0.26
8	0.22	0.20	0.23	0.27	.23	0.23	0.19	0.22	0.26	0.25

由表 2 可知, 位于表中最右列的风电机组轴向诱导因子  $a$  也未达到 0.33。

## 5 结 论

对已建风电场, 减少风电场尾流效应, 提高风电场整体输出功率是风电场优化控制的主要目标之一。为此, 提出一种考虑尾流效应的风电场优化控制方法, 并以丹麦 Horns Rev 风电场为研究对象,

对来流风速为 8.5 和 12 m/s, 来流风向 270° 的风况分别进行了计算分析, 计算结果表明:

1) 当来流风速为 8.5 m/s, 来流方向为 270°, 优化前输出功率为  $5.12 \times 10^7$  W, 优化后输出功率为  $5.63 \times 10^7$  W, 优化前后功率相差  $5.1 \times 10^6$  W, 优化后风电场整体输出功率提高了 9.96%。

2) 当来流风速为 12 m/s, 来流方向为 270°, 优化前输出功率为  $1.44 \times 10^8$  W, 优化后输出功率为

$1.58 \times 10^8$  W, 优化前后功率相差  $1.4 \times 10^7$  W, 优化后风电场整体输出功率提高了 9.72%。

提出的考虑尾流效应的风电场优化控制方法能够提高风电场整体输出功率, 但由于风电场优化控制系统具有高维数、非线性、多参数耦合特性, 仍需进一步探寻更为优秀的风电场优化控制方法。

### [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: steady-state and dynamic behaviour[J]. *Renewable Energy*, 2012, 39(1): 329—338.
- [3] 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.
- [3] Chen Kun, He Dexin. 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.
- [4] Vermeer L J, Sorensen J N, Crespo A. Wind turbine wake aerodynamics[J]. *Progress in Aerospace Sciences*, 2003, 39(Sup 6-7): 467—510.
- [5] 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.
- [6] 舒 进, 郝治国, 张保会. 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.
- [6] Shu Jin, Hao Zhiguo, Zhang Baohui, et al. Wind farm coordinated control for power optimization[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(34): 10—19.
- [7] Barthelme R, Frandsen S, Jensen L, et al. Verification of an efficiency model for very large wind turbine cluster [A]. *Proceedings Copenhagen Offshore Wind [C]*, Copenhagen, Denmark, 2005.
- [8] Lissman P B S. Energy effectiveness of arbitrary arrays of wind turbines[J]. *Journal of Energy*, 1978, 1(6): 323—328.
- [9] Abramovich G N. *The Theory of Turbulent Jets [M]*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press, 1963.
- [10] Jensen N O. A note on wind generator interaction [R]. Denmark: Riso National Laboratory, 1983.
- [11] 曾利华, 王 丰, 刘德友. 风电场风机尾流及其叠加模型的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2011, 31(19): 37—42.
- [11] Zeng Lihua, Wang Feng, Liu Deyou. Research on wind turbine wake model and overlapping in wind farm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2011, 31(19): 37—42.
- [12] Ainslie J F. Calculating the flow field in the wake of wind turbines[J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 1998, 27(1-3): 213—224.
- [13] Smith D, Taylor G J. Further analysis of turbine wake development and interaction data[A]. *Proceedings of the 13th BWEA Wind Energy Conference [C]*, Swansea, UK, 1991, 325—331.
- [14] Larsen G C. A simple wake calculation procedure [R]. Roskilde: Riso National Laboratory, 1998.
- [15] Narayana M, Putrus G A, Jovanovic M, et al. Generic maximum power point tracking controller for small-scale wind turbines[J]. *Renewable Energy*, 2012, 44(4): 72—79.
- [16] Chen Chiung-Hsing, Hong Chih-Ming, Cheng Fu-Sheng. Intelligent speed sensorless maximum power point tracking control for wind generation system [J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2012, 42(1): 399—407.
- [17] Abdullah M A, Yatim A H M, Tan C W, et al. A review of maximum power point tracking algorithms for wind energy systems [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 3220—3227.
- [18] Thomas A C, Himmelman F. Added turbulence and optimal power distribution in large off-shore wind farms [D]. Lund: Lund University, 2010.
- [19] Schepers J G, Vander Pijl S P. Improved modelling of wake aerodynamics and assessment of new farm control strategies[J]. *Journal of Physics Conference Series*, 2007, 75(1): 012039—012046.
- [20] Gebraad P M O, Teeuwisse F W, van Wingerden J W, et al. A data-driven model for wind plant power optimization by yaw control[A]. *American Control Conference (ACC) [C]*, Portland, OR, 2004.
- [21] Juelsgaard M, Schiøler H, Leth J. Wind farm dispatch control for demand tracking and minimized fatigue[J]. *IFAC Symposium on Power Plant and Power System Control*, 2012, 8(1): 381—386.

- [22] Liu Jizhen, Liu Yu, Zeng Deliang, et al. Optimal short-term load dispatch strategy in wind farm [J]. *Science China Technological Sciences*, 2012, 55(4): 1140—1145.
- [23] Soleimanzadeh M, Wisniewski R. An optimal control scheme to minimize loads in wind farms [A]. 2012 IEEE International Conference on Control Applications (CCA) [C], Dubrovnik, Croatia: IEEE, 2012.
- [24] Madjidian D, Mårtensson K, Rantzer A. A distributed power coordination scheme for fatigue load reduction in wind farms [A]. American Control Conference (ACC) [C], San Francisco, CA: IEEE, 2011.
- [25] Marden J R, Ruben S D, Pao L Y. A model-free approach to wind farm control using game theoretic methods [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2013, 21(4): 1207—1214.
- [26] Gebraad P M O, Wingerden J W. Maximum power-point tracking control for wind farms [J]. *Wind Energy*, 2015, 18(3): 429—447.
- [27] Behnood A, Gharavi H, Vahidi B, et al. Optimal output power of not properly designed wind farms, considering wake effects [J]. *Electrical Power and Energy Systems*, 2014, 63(12): 44—50.
- [28] Soleimanzadeh M, Wisniewski R, Kanev S. An optimization framework for load and power distribution in wind farms [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2012, 107-108: 256—262.
- [29] 王俊, 段斌, 苏永新. 基于尾流效应的海上风电场有功出力优化 [J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(4): 26—31.
- [29] Wang Jun, Duan Bin, Su Yongxi. Optimization of active power output in offshore wind farms based on wake effect [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(4): 26—31.
- [30] 顾波, 刘永前, 孟航, 等. 可用于风电场优化控制的尾流快速计算方法 [J]. *太阳能学报*, 2015, 36(7): 1658—1663.
- [30] Gu Bo, Liu Yongqian, Meng Hang, et al. The study of wake fast calculation algorithm for optimization wind farm control [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica*, 2015, 36(7): 1658—1663.
- [31] Knudsen T, Bak T, Svenstrup M. Survey of wind farm control-power and fatigue optimization [J]. *Wind Energy*, 2015, 18(8): 1333—1351.
- [32] David R V. Investigation of observed and modeled wake effects at Horns Rev using Wind PRO [D]. Denmark: Technical University of Denmark, 2006.
- [33] Barthelmie R J, Frandsen S T, Hansen K. Modelling the impact of wakes on power output at Nysted and Horns Rev [A]. European Wind Energy Conference and Exhibition (EWEC) [C], Parc Chanot, Marseille, France, 2009.
- [34] Barthelmie R J, Pyor S C, Frandsen S T. Quantifying the impact of wind turbine wakes on power output at offshore wind farms [J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2010, 27(8): 1302—1317.
- [35] Crespo A, Hernandez J, Frandsen S. Survey of modelling methods for wind turbine wakes and wind farms [J]. *Wind Energy*, 1999, 2(1): 1—24.
- [36] 李丽, 牛奔. 粒子群优化算法 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009.
- [36] Li Li, Niu Ben. Particle swarm optimization algorithm [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2009.
- [37] 钱锋. 粒子群算法及其工业应用 [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [37] Qian Feng. Particle swarm optimization and its industrial applications [M]. Beijing: Science Press, 2013.
- [38] Rathmann O, Frandsen S, Barthelmie R. Wake modelling for intermediate and large wind farms [A]. EWEC 2007 Wind Energy Conference and Exhibition [C], Milan, Italy, 2007.

## STUDY OF WIND FARM OPTIMAL CONTROL TECHNOLOGY CONSIDERING WAKE EFFECT

Gu Bo<sup>1</sup>, Hu Hao<sup>1</sup>, Liu Yongqian<sup>2</sup>, Zhang Yang<sup>1</sup>, Kang Shun<sup>2</sup>

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China; 2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources(North China Electric Power University), Beijing 102206, China)

**Abstract:** Aiming at built wind farms, a wind farm optimal control technology considering wake effect was proposed, which reduces the wake effect and improves the overall power output of wind farms. The quantitative relationships between the variation of state parameters, the power output and the wake distribution of wind turbines were studied, and the coupling relationships between the variation of state parameters, the power output and the wake distribution of wind turbines were also revealed. The calculation method of the intersection area between wake and wind wheel was presented, and the wake superposition model of multiple wind turbines was established. Taking the maximum output power of wind farm as the objective function, the axial induction factor as the optimization parameter, the particle swarm algorithm as the optimization algorithm, and the optimal control model of the wind farm considering wake effect was established. The wind farm in Horns Rev of Denmark is used as the case study to calculate and analyze. The results showed that the proposed wind farm optimal control method considering wake effect can improve the overall output power of the wind farm.

**Keywords:** wind turbine; optimal control; wind farm; wake model; particle swarm algorithm