

考虑位置可移动性与尾流耦合关系的 浮式风电场分区功率优化方法

高飞, 艾欣*, 周帅, 潘玺安

(新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206)

Floating Wind Farm Partitioning-based Power Optimization Method Considering Position Mobilities and Wake Coupling Relationships

GAO Fei, AI Xin*, ZHOU Shuai, PAN Xi'an

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China)

ABSTRACT: Constructing floating offshore wind farms can utilize more stable wind resources in the deep sea, but the wake effect will have negative impacts on wind farm output power. Compared to bottom-fixed wind turbines, the mobility of floating wind turbine can further mitigate adverse effects of wake on wind farm output power by optimizing their positions, and fully consider influences of yaw angle and axial induction factor in the meanwhile. Whereas wake effects create complex interaction relationships that hinder power optimization in floating wind farms, centralized optimization also experiences diminished efficiency as the number of wind turbines rises. Therefore, for reflecting physical mobility characteristics to position constraints, the moveable range of floating wind turbine is firstly characterized. Subsequently, for further discussing influences of mobility on wake relationships on the basis of position constraints, a Gaussian-wake based wake coupling relationship model is proposed for describing wake coupling intensities. Then, for transforming the centralized optimization to the partitioning-based one through constructing the stable digraph based on wake coupling intensities, a floating wind farm partitioning based on label propagation algorithm improvement algorithm is proposed. Finally, simulation and verification are conducted in a regular layout 5×5 floating wind farm with 25 wind turbines. Results show that, compared to only optimizing yaw angles and axial induction factors, the wind farm output power can be raised by 2.443%~11.189% with positions collaboratively optimized. The proposed partitioning-based power optimization method reduces the mean calculation time by 69.776% compared to

centralized optimization.

KEY WORDS: floating offshore wind farm; power optimization; wake effect; wake coupling relationship; partitioning algorithm

摘要: 建设浮式风电场可利用深远海更稳定的风资源,但尾流效应会对风场出力造成负面影响。相较于固定底座式风机,浮式风机所具有的可移动性使其能在风场功率优化问题中充分考虑偏航角、轴向诱导因子影响的同时,通过优化自身位置进一步缓解尾流效应对风场出力的影响。而浮式风电场功率优化同样要面对风机间尾流的复杂影响关系,且随风机数量增加集中式优化方法将面临求解效率的下降。因此,为将浮式风机的物理移动特性反映为位置约束,首先,对浮式风机的可移动范围进行刻画;其次,在位置约束基础上,为进一步讨论可移动性对浮式风机之间尾流关系的影响,提出基于 Gauss 尾流的尾流耦合关系模型描述浮式风机间尾流耦合强度;然后,根据所得尾流耦合强度,为将集中式优化问题通过构建稳定有向图转化为分区优化问题以提高求解效率,提出基于标签传播算法改进得到的浮式风电场分区算法;最后,在包含 25 台风机的 5×5 规则布局浮式风电场内进行仿真验证。结果表明,较只优化偏航角、轴向诱导因子,协同优化浮式风机位置与运行状态可提升 2.443%~11.189% 的风场功率,所提分区功率优化方法平均计算时间较集中式优化减少了 69.776%。

关键词: 浮式风电场; 功率优化; 尾流效应; 尾流耦合关系; 分区算法

0 引言

为实现“双碳”目标,以风能为代表的清洁能源得到不断开发^[1]。与陆上风电相比,海上风电具有发电利用小时数高、不占用陆地资源等优势,使

基金项目: 国家重点研发计划项目(2021YFB4000104)。
National Key R&D Program of China (2021YFB4000104).

得海上风电的建设规模不断扩大^[2-3]。并且风能资源在深远海处更加稳定^[4],海上风电正逐步向深远海迈进^[5-6]。随着离岸距离和水深的增加,固定底座式风机的建设变得更加困难,而浮式风机因具有更好的深海适应性和位置灵活性^[7],使得建设浮式风电场正成为发展深远海风电的一种可行解决方案^[8]。

然而,和陆上风电类似,浮式风电场同样面临因尾流效应所导致的功率损失问题^[9]。此外,浮式风电场内复杂的尾流影响增加了计算风场功率的难度。并且随风机数量增加,以风场为整体的集中式优化方法面临决策变量维数增加、求解效率降低等问题。因此,如何能够尽量降低尾流效应对浮式风电场功率影响,在提高功率优化问题求解效率同时兼顾优化精度的建模与求解方法亟待研究。

在现有降低尾流效应影响的研究中,主要有基于风机偏航角调整的尾流偏转^[10-11]、基于风机轴向诱导因子调节的功率减载^[12-13]及两者相结合的策略。其中,文献[14-16]通过风机的偏航角、轴向诱导因子的优化,缓解尾流影响,实现浮式风电场输出功率的提升。但上述文献未考虑浮式风机位置的优化,对浮式风机位置灵活性考虑的欠缺限制了浮式风电场减少尾流影响的能力。而 IDEOL 公司所提出的可移动浮式风机概念^[17]为浮式风机的位置优化提供了基础,通过调整系泊缆绳,该可移动浮式风机能够固定于系泊锚点所构成的直线或平面区域范围内的任意位置。文献[18]基于此概念在 6×6 布局的浮式风电场内进行浮式风机位置的优化,并验证合理安排风机位置对浮式风电场效率的提升作用。文献[19]考虑浮式风机的可移动性,提出一种自适应风向的浮式风机位置排布策略,和传统浮式风电场布局相比可提高 1.6% 的年发电量。上述工作虽为通过改变浮式风机位置实现浮式风电场功率提升的优化方式提供了理论依据,但在模型中未考虑偏航角、轴向诱导因子影响。因而,如何结合浮式风机位置、偏航角、轴向诱导因子进行浮式风电场的功率优化仍需进一步研究。

同时,风电场内存在着复杂的尾流耦合关系,为尽量降低功率优化的难度,需要对此进行合理描述。为此,文献[20]以尾流效应造成的平均风速亏损大小为衡量风机之间尾流耦合强弱标准。类似地,文献[21]基于因风机距离不同所造成的尾流遮蔽强弱,将具有相似尾流遮蔽程度的风机视为同一耦合集群。文献[22]基于风机偏航角的变化范围建

立了尾流干扰模型,通过分析下游风机是否位于上游风机的尾流干扰范围内判断尾流耦合。但是,浮式风机的可移动性将改变不同风机之间的相对位置,上述方法只能分析风机处于当前位置时的尾流耦合关系,尚无法直接应用于位置可移动风机尾流耦合关系的描述。

而在应对因风机数量增加带来的集中式功率优化方法求解效率下降问题所提出的求解效率提升方案中,文献[23]对所使用的 Jensen 尾流模型进行分段线性化,提高了求解效率,但所基于的一维尾流模型存在着尾流刻画精度不足的问题。因此,为兼顾模型刻画精度与求解效率,有学者提出可以通过将风电场划分为多个区域,即将原集中式功率优化问题在各个区域内独立求解,以减少计算时长。其中,文献[24-25]根据尾流影响将浮式风电场构建为有向图,并采用稀疏化尾流有向图(sparsified wake digraph, SWD)算法将浮式风电场分为多个子图,在各个子图内独立优化风场功率。但该算法在划分子图时只考虑风机的初始状态,忽略优化过程中风机状态调整可能导致所分子图的变化,对优化结果的准确性造成一定影响。文献[26]结合 K-means++ 和谐聚类(spectral clustering, SC)算法提出风电场功率两步处理优化方法,该方法事先假定风机的分簇数量,首先进行快速优化并根据优化结果不断更新簇群内的风机,待分簇结果稳定后再进行平缓优化。然而,该方法需要在风电场已知最优分簇数量的前提下进行,所基于的先验信息假设在实际生产场景中可能存在一定的适用性问题。因此,如何实现浮式风电场的合理分区从而在提高求解效率的同时兼顾优化精度还有待进一步讨论。

综上所述,为研究如何减少尾流效应对浮式风电场功率的不利影响,提高功率优化问题求解效率的同时兼顾优化精度,本文提出一种考虑位置可移动性与尾流耦合关系的浮式风电场分区功率优化方法。首先,为了在考虑偏航角、轴向诱导因子的同时进一步考虑风机位置可移动性对浮式风电场功率的影响,将浮式风机的实际物理移动特性反映为数学形式的位置约束条件,对浮式风机的可移动范围进行刻画;其次,基于位置约束,为了进一步讨论位置可移动性对浮式风机之间尾流关系的影响,提出一种基于 Gauss 尾流的尾流耦合关系(Gaussian-wake based wake coupling relationship, G-WCR)模型描述浮式风机之间的尾流耦合强度;

然后,基于 G-WCR 模型所描述的尾流耦合强度,为将集中式优化问题通过构建稳定有向图的方式转化为分区优化问题并进行合理分区,提出一种基于标签传播算法改进得到的浮式风电场分区(floating wind farm partitioning based on label propagation algorithm improvement, FWFP-LI)算法;最后,通过算例分析,对本文所提模型与分区功率优化方法在浮式风电场的功率提升作用、求解效率提高效果及分区功率优化的精度方面进行验证。

1 浮式风机位置可移动范围刻画

借鉴文献[18]的相关概念和文献[27]的相关原理,本文所研究的位置可移动性指浮式风机在确定目标位置之后,能够通过系泊缆绳长度的调整使自身固定于系泊锚点所构成的平面区域范围内的指定位置,也即位置可控。为了进一步考虑浮式风机位置可移动性对浮式风电场功率的影响,需要参考浮式风机的实际物理移动特性并将其反映为位置约束条件。考虑到目前半潜式浮式风机应用广泛^[4],因此,后文将基于图 1(a)所示半潜式浮式风机结构,对其位置可移动范围进行刻画。

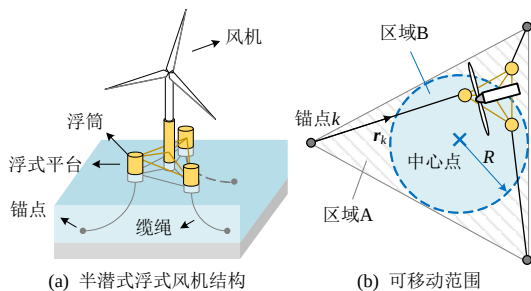


图 1 半潜式浮式风机结构及可移动范围
Fig. 1 Semi-submersible floating wind turbine structure and its moveable range

1.1 半潜式浮式风机结构

在图 1(a)中,半潜式浮式平台是由 3 个浮筒构成的等边三角形结构,部分没入水中,风机安装在该三角形结构的正中心。固定在海底的锚点、系泊缆绳组成浮式风机的系泊系统,锚点组成等边三角形的顶点,该等边三角形中心称为浮式风机的“中心点”,即浮式风机的初始位置。

1.2 基于半潜式浮式风机的可移动范围刻画

半潜式浮式风机依靠系泊定位时,其正常运行时的稳定位置受到外界来风在风机上产生的风推力 F_{thrust} 、系泊缆绳拉力在水平方向上的分量 H_{moor} 、浮体浮力、海浪载荷和流体粘滞阻力的影响。当浮式风机处于稳定状态时,可以认为其所受到的流体

粘滞阻力为零,且浮体浮力与浮式风机自身的重力达到平衡关系^[28]。此外,由于浮式风机正常运行时所受周期性作用的海浪载荷量级与 F_{thrust} 相比可以忽略^[29],因而,浮式风机的稳定位置可由 F_{thrust} 、 H_{moor} 共同确定,二者计算方式分别为:

$$\begin{cases} F_{thrust} = \frac{1}{2} C_T \rho \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 v^2 \cdot \frac{\mathbf{v}}{\|\mathbf{v}\|_2} \\ C_T = 4a(1 - a \cos \gamma) \end{cases} \quad (1)$$

$$H_{moor} = -\sum_{k=1}^3 f_{moor}(r_k) \cdot \frac{\mathbf{r}_k}{\|\mathbf{r}_k\|_2} \quad (2)$$

式中: ρ 为空气密度; D 为风机转子的直径; $\mathbf{v}$ 为风向向量; $\|\mathbf{v}\|_2$ 为 $\mathbf{v}$ 的 2-范数; C_T 为风机的推力系数; a 为风机的轴向诱导因子; γ 为风机的偏航角, a 、 γ 确定了浮式风机的运行状态; $\mathbf{r}_k$ 为图 1(b)所示第 k 个锚点指向浮式平台浮筒的距离向量, $k \in \{1, 2, 3\}$ 为锚点的索引; f_{moor} 为查表函数^[14],可以根据 $\mathbf{r}_k$ 的不同模值查得系泊缆绳的水平拉力。

故浮式风机的稳定位置 (x, y) 可以通过迭代求解以下力的平衡方程组得到:

$$\begin{cases} F_{thrust,x}(x, y) + H_{moor,x}(x, y) = 0 \\ F_{thrust,y}(x, y) + H_{moor,y}(x, y) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

当风速、风机运行状态一定时,遍历全风向范围,迭代求解式(3)便得到浮式风机稳定位置与风向之间的关系,如附图 A1 所示。可见,浮式风机在不同风向下稳定位置所构成的轨迹可以用某一圆周近似表示。

需要指出的是,浮式风机越偏离中心点、越靠近图 1(b)所示区域 A 的锚点位置,所需系泊缆绳的拉力越大^[30],易对系泊系统的安全产生不利影响。因此,本文认为浮式风机正常运行时偏离中心点的轨迹构成浮式风机的最大可移动边界,并将浮式风机的可移动范围建模为自中心点向外的圆形区域,如图 1(b)阴影区域 B 所示,该区域可由式(4)表述。

$$(x - x^{cen})^2 + (y - y^{cen})^2 \leq R^2 \quad (4)$$

式中: (x^{cen}, y^{cen}) 为浮式风机的中心点坐标; R 为风机偏离中心点的最大位移距离。

式(4)即为本文最终刻画得到的浮式风机位置可移动范围,反映为浮式风机的位置约束, R 的取值可视具体算例或参考半潜式浮式风机结构由式(1)–(3)所描述的最大可移动边界确定。

2 浮式风机尾流耦合关系建模

尾流效应会使上、下游的浮式风机之间存在尾

流耦合关系, 即两者的输出功率不可单独确定。本节将首先根据标准 Gauss 尾流模型^[31]描述浮式风电场内的尾流分布。其次, 基于标准 Gauss 尾流模型和前文刻画所得浮式风机可移动范围, 为描述位置可移动性对浮式风机之间尾流关系的影响, 提供后续浮式风电场分区功率优化的基础, 本文提出 G-WCR 模型。

2.1 标准 Gauss 尾流模型

在标准 Gauss 尾流模型中, 上游风机尾流使风电场内下游位置 (x, y) 处的风速 $v(x, y)$ 与稳态风速 v_∞ 存在差值, 记为风速亏损 $\Delta v(x, y)$ 。存在风速亏损的区域称为“尾流区”, 尾流区存在上、下边界, 如图 2 所示, 其中, 风机偏航角 γ 的正方向取为顺时针方向。按照与风机转子的距离不同, 尾流区分为近、远尾流区, 其分界点横坐标 x_0 可通过式(5)计算。

$$x_0 = x_R + \frac{D \cos \gamma (1 + \sqrt{1 - C_T})}{\sqrt{2} [4k_1 I + 2k_2 (1 - \sqrt{1 - C_T})]} \quad (5)$$

式中: k_1 、 k_2 为拟合系数; I 为湍流强度; x_R 为风机转子所在位置的横坐标。

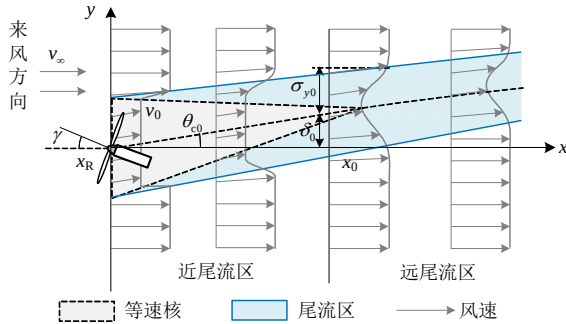


图 2 Gauss 尾流模型示意图

Fig. 2 Schematic diagram of Gaussian wake model

根据所处近、远尾流区的不同, 风速亏损的计算方式为

$$\frac{\Delta v(x, y)}{v_\infty} = \begin{cases} (1 - \sqrt{1 - C_T}) e^{-\frac{1}{2} \frac{(y - \delta)^2}{\sigma_y^2}}, & x_R \leq x < x_0 \\ (1 - \sqrt{1 - \frac{C_T \cos \gamma}{8 \sigma_y \sigma_z / D^2}}) e^{-\frac{1}{2} \frac{(y - \delta)^2}{\sigma_y^2}}, & x \geq x_0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: σ_y 、 σ_z 分别为 y 、 z 方向上的尾流宽度, 计算方式见文献[31]; $x_R \leq x < x_0$ 表示近尾流区, $x \geq x_0$ 表示远尾流区。

但当风机调整偏航角、轴向诱导因子时, 将使尾流中心产生偏转, 改变尾流区在 y 方向上的覆盖范围, 影响风速的分布情况。尾流中心偏转量 δ 计算方式为

$$\delta = \begin{cases} \frac{x - x_R}{x_0 - x_R} \delta_0, & x_R \leq x < x_0 \\ \delta_0 + \frac{\theta_{c0} E_0}{5.2} \sqrt{\frac{\sigma_{y0} \sigma_{z0}}{k_y k_z M_0}}, & x \geq x_0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: θ_{c0} 为尾流中心的偏转角; δ_0 为 $x=x_0$ 处的尾流中心偏转量。 θ_{c0} 和 δ_0 计算方式为

$$\begin{cases} \theta_{c0} \approx \frac{0.3\gamma}{\cos \gamma} (1 - \sqrt{1 - C_T \cos \gamma}) \\ \delta_0 \approx \tan \theta_{c0} \cdot x_0 \end{cases} \quad (8)$$

式(7)其余参数的计算可参考文献[31]。

由此, 基于尾流中心偏转量可得风机尾流区的覆盖范围, 进而根据式(6)确定尾流区内的风速亏损, 最终实现浮式风电场内风速分布的描述。

2.2 G-WCR 模型

在含有 N_{WT} 台风机的浮式风电场内, 记 $M = \{M_1, M_2, \dots, M_{N_{WT}}\}$ 为用 (x, y) 坐标表示的浮式风机位置集合, S_γ 、 S_a 分别为浮式风机偏航角、轴向诱导因子取值范围的集合。本文称风机 i 、 j 存在着“尾流耦合关系”, 如果 $\exists (x_i, y_i) \in M_i$, $\exists (\gamma, a_i) \in S_\gamma \times S_a$, 使得上游风机 i 产生的尾流在下游风机 j 处造成的风速亏损与稳态风速之比非负, 即:

$$\frac{\Delta v_{i \rightarrow j}(x_j, y_j)}{v_\infty} > 0 \quad (9)$$

式中: $M_i = \{(x, y) | (x - x_i^{\text{cen}})^2 + (y - y_i^{\text{cen}})^2 \leq R^2\}$; $S_\gamma = \{\gamma | \gamma_{\min} \leq \gamma \leq \gamma_{\max}\}$; $S_a = \{a | a_{\min} \leq a \leq a_{\max}\}$; “ $\times$ ”为 Cartesian 积。

但是, 某一时刻存在着尾流耦合关系的浮式风机之间可能因自身位置的调整、运行状态的不同而解除耦合, 故仅根据式(9)遍历集合 M 、 $S_\gamma \times S_a$ 判断浮式风机之间是否存在尾流耦合关系是不准确的。根据 2.1 节的标准 Gauss 尾流模型可知, 存在尾流耦合关系的下游风机即处于上游风机产生的尾流区内。因而, 欲确定不同浮式风机之间的尾流耦合关系, 即确定下游风机是否处于上游风机产生的最大尾流影响范围内, 也即是否处于尾流区边界的“上、下极限”内。

因此, 后文将基于标准 Gauss 尾流模型, 分析浮式风机位置、运行状态对尾流耦合关系的影响, 提出 G-WCR 模型。首先, 给出尾流区边界极限的

计算方法;其次,基于尾流区边界极限确定不同风机间的尾流耦合关系,从而在后续阶段可将浮式风电场解耦为多个独立区域,为求解效率的提高、浮式风电场分区功率优化的实现提供基础。

2.2.1 尾流区边界极限的计算

如图3(a)所示,设实际入流风向为 φ ,风机 i 、 j 分别位于 $(x_i^{\text{cen}}, y_i^{\text{cen}})$ 、 (x_j, y_j) 。为便于讨论分析,进行如图3(b)的坐标变换,将实际入流风向变换为与 x' 轴正方向一致的参考方向,此时,风机 i 的中心点成为原点,风机 j 相对于风机 i 的坐标为

$$\begin{bmatrix} x'_{ij} \\ y'_{ij} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi \\ \sin \varphi & \cos \varphi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_j - x_i^{\text{cen}} \\ y_j - y_i^{\text{cen}} \end{bmatrix} \quad (10)$$

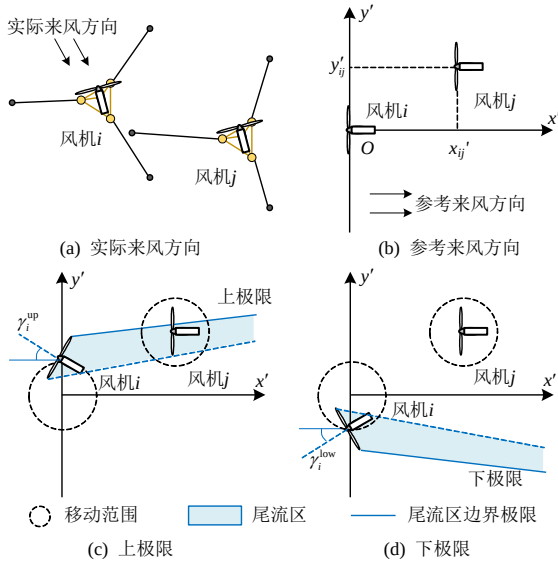


图3 尾流区边界极限的计算示意图

Fig. 3 Schematic diagram for calculating the limits of the wake region boundary

限于篇幅,尾流区边界极限的详细计算推导过程见附录B。由附录B可知,风机 i 欲对下游产生最大的尾流影响范围,其应处于相对坐标的 $(0, R)$ 位置并运行于 $(\gamma_i^{\text{up}}, a_i^{\text{up}})=(\gamma_{\text{max}}, a_{\text{max}})$ 状态,或处于 $(0, -R)$ 位置并运行于 $(\gamma_i^{\text{low}}, a_i^{\text{low}})=(\gamma_{\text{min}}, a_{\text{max}})$ 状态。因此,风机 i 产生的尾流区边界极限可以表示为

$$\begin{cases} W_i^{\text{up}}(x'_{ij}) = R + \sigma_{y,i}(x'_{ij}; \gamma_i^{\text{up}}, a_i^{\text{up}}) + \delta_i(x'_{ij}; \gamma_i^{\text{up}}, a_i^{\text{up}}) \\ W_i^{\text{low}}(x'_{ij}) = -R - \sigma_{y,i}(x'_{ij}; \gamma_i^{\text{low}}, a_i^{\text{low}}) - \delta_i(x'_{ij}; \gamma_i^{\text{low}}, a_i^{\text{low}}) \end{cases} \quad (11)$$

式中 $W_i^{\text{up}}(x'_{ij})$ 、 $W_i^{\text{low}}(x'_{ij})$ 分别为风机 i 在风机 j 处产生的尾流区边界上、下极限。

2.2.2 基于尾流区边界极限的尾流耦合关系建模

结合风机 j 的移动范围,本文给出风机 i 、 j 的

尾流耦合关系确定方法,即当风机 j 的移动范围与风机 i 产生的尾流边界上、下极限不存在重叠区域时:

$$\begin{aligned} y'_{ij} + R + \frac{D}{2} &< W_i^{\text{low}}(x'_{ij}) \\ \text{或} y'_{ij} - R - \frac{D}{2} &> W_i^{\text{up}}(x'_{ij}) \end{aligned} \quad (12)$$

上文研究说明,无论如何调整风机 i 的位置、偏航角和轴向诱导因子,风机 j 都不会与之产生尾流耦合,因此风机 i 、 j 的功率解耦,风机 i 、 j 的输出功率只取决于自身所处位置的风速 $v(x, y)$ 及自身运行状态,可单独计算:

$$P = \begin{cases} \frac{1}{2} C_p \rho \pi \left(\frac{D}{2}\right)^2 [v(x, y)]^3, & v_{\text{in}} \leq v(x, y) < v_{\text{rated}} \\ P_N, & v_{\text{rated}} \leq v(x, y) < v_{\text{out}} \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (13)$$

式中: v_{in} 、 v_{out} 、 v_{rated} 分别为风机的切入、切出、额定风速; P_N 为风机的额定功率; C_p 为风机的风能利用系数^[14]:

$$C_p = 4a(1-a)^2 \eta_p (\cos \gamma)^{k_p} \quad (14)$$

式中: η_p 为能量转换效率; k_p 为拟合系数。

而若风机 i 、 j 存在尾流耦合关系即不能实现功率解耦,则必须确定了两者所处位置、运行状态之后,才能进行输出功率的计算。为了衡量这种尾流耦合关系的强弱,将式(9)的最大值称为风机 i 、 j 之间的尾流“耦合强度”。根据2.2.1节的分析,耦合强度可以由式(15)得到。

$$\Omega_{ij} = \max_{x'_i=0, y'_i=0} \left\{ \frac{\Delta v_{i \rightarrow j}(x'_{ij}-R, |y'_{ij}|)}{v_{\infty}}, \frac{\Delta v_{i \rightarrow j}(x'_{ij}, |y'_{ij}|-R)}{v_{\infty}} \right\} \quad (15)$$

即在相对坐标下,分别计算上游风机 i 处于 $(R, 0)$ 、 $(0, R)$ 位置时对坐标 $(x'_{ij}, |y'_{ij}|)$ 处造成的风速亏损与稳态风速之比,取二者的最大值作为风机 i 、 j 之间的耦合强度;特别地,对于不存在尾流耦合关系的风机 i 、 j , $\Omega_{ij}=0$ 。在计算浮式风电场内所有风机之间的耦合强度后,可以得到 $N_{\text{WT}} \times N_{\text{WT}}$ 维耦合强度矩阵 Ω , Ω 的行代表产生尾流的上游风机、列代表受影响的下游风机。

至此,式(10)–(12)组成本文所提G-WCR模型,该模型已经考虑了浮式风机位置移动、偏航角和轴向诱导因子调整对尾流耦合关系的影响,因此在后续优化过程中 Ω 保持不变。特别地,当式(11)、(12)中的参数 $R=0$ 时,G-WCR退化为固定底座式风机的尾流耦合关系模型。

3 浮式风电场分区功率优化方法

为减小尾流效应影响、提高浮式风电场功率, 本节将首先给出浮式风电场功率优化的目标函数和约束条件。其次, 为提高功率优化问题的求解效率并兼顾优化结果精度, 本节将基于 2.2.2 节所提 G-WCR 模型计算得到的耦合强度矩阵构建浮式风电场稳定有向图。然后, 提出一种 FWFP-LI 浮式风电场分区算法。最后, 给出本文所提浮式风电场分区功率优化方法的总体框架。

3.1 浮式风电场功率优化目标函数及约束条件

本文将浮式风机位置、偏航角和轴向诱导因子作为决策变量进行优化, 目标函数为最大化浮式风电场的输出功率:

$$\max F = \sum_{i=1}^{N_{WT}} P_i(x_i, y_i; \gamma_i, a_i) \quad (16)$$

式中: N_{WT} 为风机数; $P_i(x_i, y_i; \gamma_i, a_i)$ 为第 i 个风机运行于 (γ_i, a_i) 状态、位于坐标 (x_i, y_i) 处的输出功率。

约束条件包括风机位置约束、运行状态约束:

$$\text{s.t. } (x_i - x_i^{\text{cen}})^2 + (y_i - y_i^{\text{cen}})^2 \leq R^2, i=1, 2, \dots, N_{WT} \quad (17)$$

$$\text{s.t. } \begin{cases} \gamma_{\min} \leq \gamma_i \leq \gamma_{\max} \\ a_{\min} \leq a_i \leq a_{\max} \end{cases}, i=1, 2, \dots, N_{WT} \quad (18)$$

式中: $\gamma_{\min}$ 、 $\gamma_{\max}$ 分别为最小、最大偏航角; $a_{\min}$ 、 $a_{\max}$ 分别为最小、最大轴向诱导因子。

由于考虑尾流效应的浮式风电场功率优化问题式(16)非凸非线性, 因此, 可考虑使用迭代式算法求解^[14,19,22,24], 本文选用基于 PID 的搜索算法 (PID-based Search Algorithm, PSA)^[32]。

3.2 基于耦合强度矩阵的浮式风电场稳定有向图构建

直接迭代求解式(16)时, 每次迭代均需重新计算场内所有风机处风速。若将浮式风电场分为多个区域, 在属于不同区域风机之间互不影响前提下, 每次迭代只需对各分区内各风机处风速重新计算, 可降低决策变量维数, 提高求解效率。

考虑到不同风机之间的影响强弱可以反映为 2.2.2 节 G-WCR 模型计算得到的耦合强度矩阵, 根据耦合强度矩阵将具有较强尾流耦合关系的风机划入相同的区域内, 使得区域与区域之间的风机不存在或忽略存在较弱的尾流耦合关系, 是实现浮式风电场区域划分的一种有效思路, 而这与“图聚类”概念具有一定的相似性。

浮式风电场内上游风机对下游风机产生的尾流影响具有一定的方向性, 可以采用有向图进行描

述^[22]。如果记 $V=\{i|i=1, 2, \dots, N_{WT}\}$ 为各个风机构成的顶点集合, 则可以采用有向图 $G=\{V, E, A\}$ 描述浮式风电场内的尾流耦合关系。其中, $E=V \times V=\{e_{i \rightarrow j}|i=1, 2, \dots, N_{WT}, j=1, 2, \dots, N_{WT}\}$ 为有向图 G 边的集合, A 为有向图 G 的邻接矩阵。

由于 G-WCR 模型已经考虑了浮式风机位置变化、偏航角和轴向诱导因子调整对尾流耦合关系的影响, 故基于 G-WCR 模型计算得到的 Ω 所构建的浮式风电场有向图不会因为优化过程中风机位置、偏航角和轴向诱导因子的调整而发生变化, 具有“稳定性”。因此, 表示顶点之间连接关系的邻接矩阵 A 可通过耦合强度矩阵 Ω 得到:

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \Omega_{ij} \neq 0 \\ 0, & \Omega_{ij} = 0 \end{cases} \quad (19)$$

式(19)表明, 若 Ω_{ij} 非零, 则 i 为上游风机, j 为下游风机, 即有向图 G 中存在自顶点 i 指向顶点 j 的边 $e_{i \rightarrow j}$, 该边的“原始边权值”为 Ω_{ij} ; 反之, $\Omega_{ij}=0$, 说明上述两个顶点不存在边的连接关系。

3.3 FWFP-LI 算法

为实现浮式风电场的分区, 本文借鉴并改进图聚类所用的标签传播算法 (label propagation algorithm, LPA)^[33], 在此基础上提出 FWFP-LI 算法, 其主要步骤如下:

1) 算法初始化。输入浮式风电场稳定有向图 G , 浮式风电场内的风机数量 N_{WT} , 确定算法的最大迭代次数 T , 为每个风机顶点 i 赋予互不相同的标签 l_i^0 , 其中 $i=1, 2, \dots, N_{WT}$ 。

2) 风机顶点更新顺序的确定。第 i 个顶点的利用度 u_i 计算方式为

$$\begin{cases} u_i = \left(\frac{d_i^{\text{in}}}{d_G}\right)^2 d_i^{\text{out}} + \left(\frac{d_i^{\text{out}}}{d_G}\right)^2 d_i^{\text{in}}, i=1, 2, \dots, N_{WT} \\ d_i^{\text{in}} = \sum_{j=1}^{N_{WT}} a_{ij}, d_i^{\text{out}} = \sum_{j=1}^{N_{WT}} a_{ji}, d_G = \sum_{i=1}^{N_{WT}} d_i^{\text{in}} \end{cases} \quad (20)$$

式中: d_i^{in} 为顶点 i 的入度; d_i^{out} 为顶点 i 的出度; d_G 为有向图 G 所有顶点的入度之和。

在计算得到各个风机顶点的利用度 $U=\{u_1, u_2, \dots, u_{N_{WT}}\}$ 后, 对 U 进行升序排列, 风机顶点自利用度小的开始更新。

3) 风机顶点邻边权重的计算。若风机顶点 i, j 之间存在有向边 $e_{i \rightarrow j}$, 则该边权重 $\omega_{i \rightarrow j}$ 定义为

$$\omega_{i \rightarrow j} = K\omega_{\text{rel}, ij} + (1-K)\omega_{\text{int}, ij} \quad (21)$$

式中: 偏置系数 $K \in [0, 1]$; 相关性权重 $\omega_{\text{rel}, ij}$, 紧密

性权重 $\omega_{\text{int},ij} \in [0,1]$ 。边权重是 FWFP-LI 算法为每条边赋予的新值,与有向图 G 的原始边权值不同,故采用“权重”、“权值”进行区分。其中:

$$\begin{cases} \omega_{\text{rel},ij} = (1 - \frac{d_i^{\text{out}} d_j^{\text{in}}}{d_G^2}) \cdot \frac{\text{card}[N(i) \cap N(j)]}{\text{card}[N(i)]} \\ \omega_{\text{int},ij} = \Omega_{ij} / \Omega_{\max} \end{cases} \quad (22)$$

式中: $N(i)$ 为顶点 i 及其邻居顶点组成的集合, $N(i) = \{j \in V | e_{i \rightarrow j} \in E, e_{j \rightarrow i} \in E\} \cup \{i\}$; $\text{card}[N(i)]$ 表示集合 $N(i)$ 的元素数; $\Omega_{\max}$ 为 Ω 内元素的最大值。

4) 风机顶点标签的更新。对风机顶点 i 的邻居顶点进行边权重累加,选择具有最高累积边权重的邻居顶点标签作为风机顶点 i 的新标签 l_i^{new} :

$$l_i^{\text{new}} = \arg \max_l \begin{cases} \sum_j \omega_{j \rightarrow i}^l, & j \in N_{\text{in}}(i) \\ \sum_j \omega_{i \rightarrow j}^l, & j \in N_{\text{out}}(i) \end{cases} \quad (23)$$

式中: $\omega_{j \rightarrow i}^l$ 为具有标签 l_j 的邻居顶点 j 指向顶点 i

的边权重; $N_{\text{in}}(i)$ 、 $N_{\text{out}}(i)$ 分别为存在有向边 $e_{j \rightarrow i}$ 、 $e_{i \rightarrow j}$ 的顶点 i 的邻居节点集合。

5) 风机顶点标签的校验。按照顶点编号自小而大遍历各个风机顶点,若存在某一项点 i 的新标签 l_i^{new} 与旧标签 l_i^0 不同,说明标签的更新过程还未达到稳定状态,令 $l^0 = l^{\text{new}}$,进行下一次迭代,转至 4); 若所有顶点的新标签均与旧标签相同或者算法达到最大迭代次数 T ,转至 6)。

6) 分区结果的输出。根据 l^{new} 将具有相同标签的风机顶点划入同一区域,完成浮式风电场的分区,输出划分结果。

FWFP-LI 的完整流程见附录 C。

3.4 浮式风电场分区功率优化方法总体框架

综上所述,本文所提考虑位置可移动性与尾流耦合关系的浮式风电场分区功率优化方法总体框架如图 4 所示,主要过程如下:

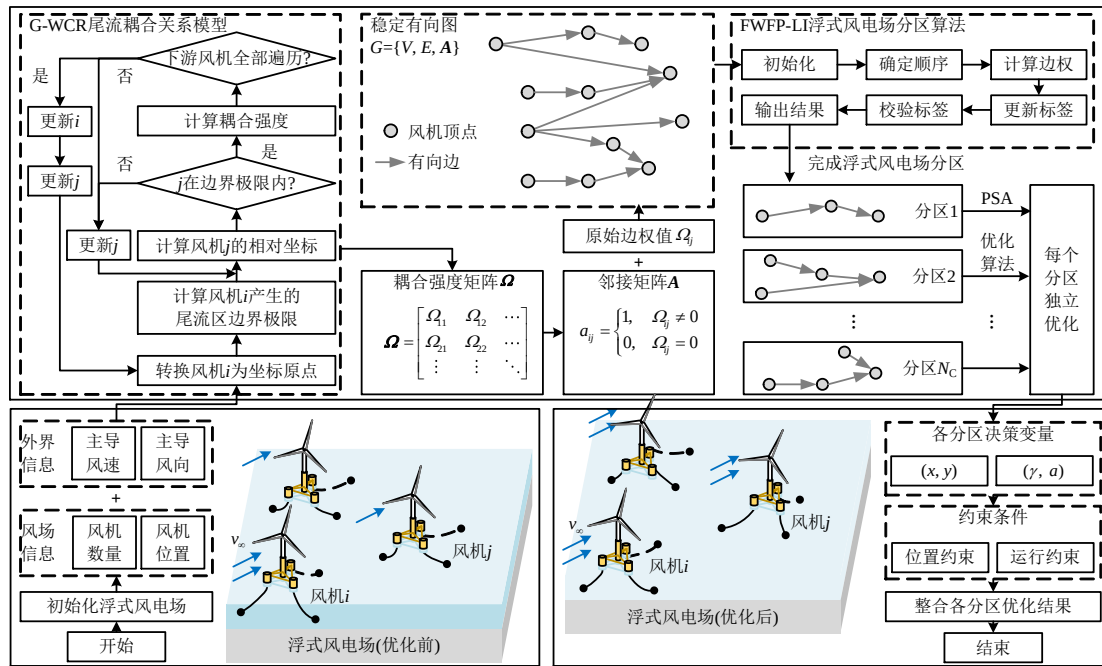


图 4 考虑位置可移动性与尾流耦合关系的浮式风电场分区功率优化方法总体框架

Fig. 4 Overall framework of floating wind farm partitioning-based power optimization method considering position mobilities and wake coupling relationships

根据当地的主导入流风速和风向,首先,使用 G-WCR 模型确定浮式风电场内不同风机之间的尾流耦合关系并计算耦合强度矩阵;其次,基于所得耦合强度矩阵,构建浮式风电场的稳定有向图,经 FWFP-LI 算法将浮式风电场分为多个区域,使得不同区域之间不存在或仅存在较弱的尾流耦合关系;最后,每个分区以风机位置、偏航角和轴向诱导因子作为决策变量,在式(17)、(18)的约束下,将式(16)

作为目标最大化本区域功率,最终实现浮式风电场整场功率的提升。

4 算例分析

4.1 算例设置

本文将浮式风电场设置为包含 25 台半潜式浮式风机的 5×5 正方形布局,如附图 A2 所示。风机参数取值参考自美国可再生能源国家实验室

(National Renewable Energy Laboratory, NREL)提供的 NREL 5 MW 风机数据, 相应的计算参数见附表 A1、A2, 并据附录 D, 取 $R=0.5D$, $K=0.8$ 。通过在 Python 中调用 NREL 开发的 FLORIS 3.5 工具包对尾流进行计算。

需要指出, 风向是决定浮式风机的位置的重要依据, 因而, 浮式风机的位置优化需要根据当地气象测量得到的主导入流风向情况确定, 且忽略持续时间较短的快速风向变化。基于此, 本文根据文献[30]提供的某地区多年风况概率数据, 选择 7 m/s 的典型风速, 并选取该地区出现概率较高的主要入流风向, 分析协同优化浮式风机位置、偏航角和轴向诱导因子的方法在典型风速、主要入流风向对浮式风电场的功率提升作用。其中, 0° 风向为正北方, 风向角度顺时针增加。

本文设置如表 1 所示的 5 个算例进行对比分析。算例 1 的所有风机均按照 $\alpha=1/3$, $\gamma=0^\circ$ 的贪婪状态运行。算例 3 的系泊定位是指半潜式浮式风机稳定位置受到风机运行状态影响, 需要根据式(3)迭代求解, 即无法对其位置进行直接优化。算例 4、5 的可移动是指基于可移动浮式风机的原理, 半潜式浮式风机的实际位置可通过系泊缆绳长度的调节固定, 而不受入流风速、风向影响, 即可以在可移动范围内对其位置进行直接优化。此外, 算例 2、3、4 所述集中式优化指将风电场内所有风机的待优化参数视为一个高维的决策变量, 代入 PSA 算法进行求解。算例 5 则使用本文所提浮式风电场分区功率优化方法, 并采用对应分区数量的多线程并行方式实现。

表 1 算例设置
Table 1 Case settings

算例	风机类型	优化变量	优化方法
1	固定式	—	—
2	固定式	α, γ	集中优化
3	半潜式(系泊定位)	α, γ	集中优化
4	半潜式(可移动)	$\alpha, \gamma, (x, y)$	集中优化
5	半潜式(可移动)	$\alpha, \gamma, (x, y)$	分区优化

4.2 浮式风电场功率优化结果

在所研究的主要入流风向下, 不同算例求解 3.1 节浮式风电场功率优化问题的结果见表 2。从表 2 可见, 当所有风机均按照贪婪策略运行时, 由于上游风机尾流效应的影响造成下游风机处的风速亏损较大, 使得按照贪婪策略运行的算例 1 浮式风电场在各个主要入流风向下功率均偏低, 尤其

是在 90°、270° 风向时, 风机之间的尾流效应影响严重, 使得浮式风电场的功率仅为 9 MW 左右。

表 2 主要入流风向下不同算例的浮式风电场功率对比

Table 2 Comparison on floating wind farm optimal power among different cases in major inflow directions

风向/(°)	浮式风电场功率/MW			
	算例 1	算例 2	算例 3	算例 4
40	27.431	28.412	28.418	29.106
90	9.234	21.532	20.096	22.903
230	27.461	28.389	27.778	29.296
270	9.234	21.369	20.204	23.760
320	28.397	28.411	28.477	29.121

算例 2、3、4 均对浮式风机的偏航角、轴向诱导因子进行了优化, 且算例 4 还结合浮式风机位置进行了协同优化, 以上算例相较于算例 1 均在一定程度上提升了浮式风电场的功率。为了详细比较算例 2、3、4 的优化效果, 图 5 以 270° 入流风向为例, 展示了经算例 2、3、4 优化之后的浮式风电场尾流分布情况。

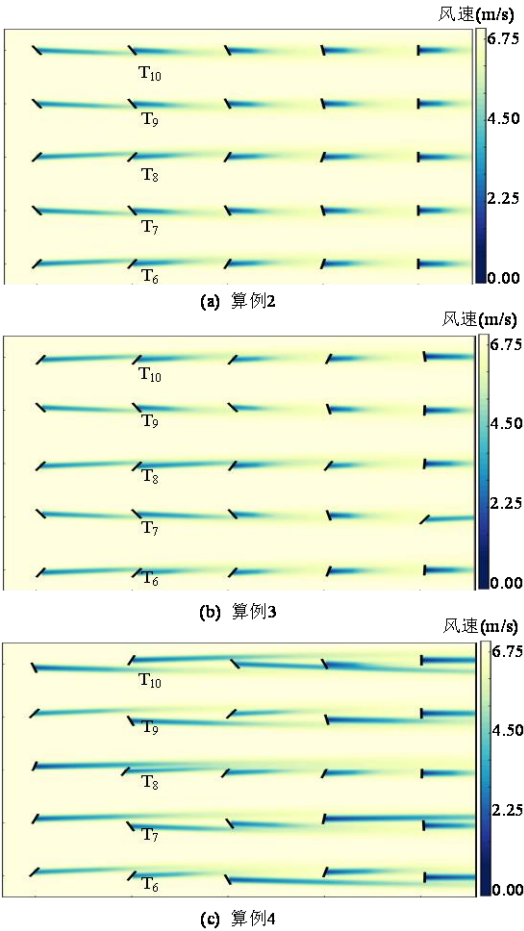


图 5 270° 风向下算例 2、3、4 的尾流分布
Fig. 5 Wake distribution of case 2, 3 and 4 under wind direction of 270°

图 5(a)中, 入流风向为 270° 时, 虽然上游风机

对自身偏航角、轴向诱导因子进行了优化调整,尽可能地使自身产生的尾流区偏离下游风机 T_6-T_{10} ,然而由于算例 2 采用的是固定底座式风机,无法移动自身位置,故下游风机 T_6-T_{10} 的入流风速仍然受到一定程度的影响,平均风速为 6.177 m/s ,如表 3 所示,低于稳态风速 11.757% 。相较于算例 2,图 5(c)中算例 4 将浮式风机位置与偏航角、轴向诱导因子进行协同优化,从而下游风机 T_6-T_{10} 能够在横风风向上调整自身位置,以避开上游风机对其产生的尾流影响,将风机 T_6-T_{10} 的平均入流风速提升至 6.937 m/s 。对于下游的其他风机也可作类似分析。由表 2 可见,入流风向为 270° 时,算例 4 较算例 2 提升了 11.189% 的浮式风电场功率。

表 3 算例 2、3、4 的部分风机入流风速对比
Table 3 Comparison on the inflow wind speed of partial wind turbines of case 2, 3 and 4

算例	风速/(m/s)				
	T_6	T_7	T_8	T_9	T_{10}
2	6.143	6.191	6.176	6.185	6.192
3	6.151	6.179	6.247	6.211	6.116
4	6.886	6.988	6.836	6.997	6.977

对比图 5(b)、(c),虽然依靠系泊定位的算例 3 能够通过优化浮式风机的运行状态从而改变自身的稳定位置,但二者存在一定的权衡关系,即风机偏航角、轴向诱导因子的过多调整也将对其自身输出功率造成负面影响。如图 6 所示,算例 3 风机 T_6-T_{10} 的偏航角普遍接近最大偏航值 30° ;故算例 3 在 270° 风向下对于浮式风电场功率的优化效果欠佳。与之相对,算例 4 能够协同优化浮式风机的位置、偏航角和轴向诱导因子,风机 T_6-T_{10} 在规避上游风机产生的尾流影响的同时不必对自身偏航角、轴向诱导因子做出过多调整,因此, 270° 风向下算例 4 较算例 3 可提升 17.600% 的浮式风电场功率。算例 2、3、4 的部分风机入流风速对比见表 3。

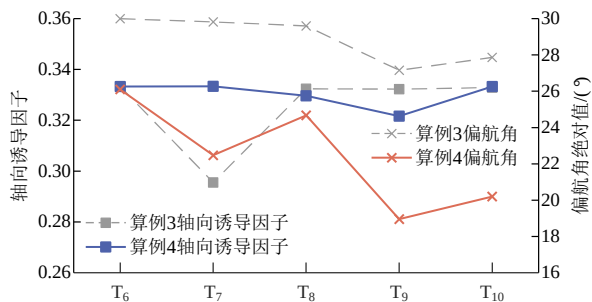


图 6 270° 风向下算例 3、4 的风机运行状态
Fig. 6 Wind turbine operation states of case 3 and 4 under wind direction of 270°

入流风向为 90° 的情况可作类似分析。而对于其他入流风向,由于尾流效应的影响较弱,算例 4 较算例 2、3 最低分别可提升 2.443% 和 2.261% 的浮式风电场功率。

4.3 G-WCR 模型及分区优化方法有效性分析

为了验证本文所提 G-WCR 模型以及浮式风电场分区功率优化方法的有效性,本文设置算例 4、5 进行对比分析。图 7、表 4 分别示出算例 4、5 在 $0^\circ\sim 80^\circ$ 风向范围内优化所得浮式风电场功率以及各算例的平均计算时长。

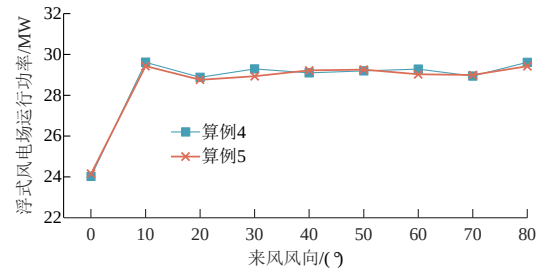


图 7 集中与分区优化所得功率的对比
Fig. 7 Comparison on optimal power of centralized and partitioning-based optimization methods

表 4 不同算例的平均计算时长

算例	平均计算时长/s
1	0.328
2	456.011
3	446.069
4	439.445
5	132.816

由图 7 可以看出,算例 5 基于 G-WCR 模型以及浮式风电场分区功率优化方法得到的浮式风电场功率基本接近集中优化的算例 4,算例 4、5 在 $0^\circ\sim 80^\circ$ 风向优化所得浮式风电场总功率分别为 257.956 MW 和 257.203 MW ,算例 5 的优化结果与算例 4 相差 -0.292% 。但是在求解效率方面,据表 4,算例 5 的平均计算时长较算例 4 缩减了 69.776% 。可以推知,本文所提 G-WCR 模型可以合理描述浮式风机的尾流耦合关系,基于 G-WCR 模型提出的浮式风电场分区功率优化方法能够在得到与集中优化相近结果的同时,有效地提高求解效率。

4.4 FWFP-LI 算法效果分析

在 4.3 节验证所提 G-WCR 模型合理性及浮式风电场分区功率优化方法有效性的基础上,为进一步分析 G-WCR 模型的适用性及本文所提 FWFP-LI 浮式风电场分区算法的效果,本节对比了算例 5 使用 FWFP-LI 算法、SWD 算法^[24]、SC 算法^[26](分区数事

先指定为 5)、LPA 算法^[33]同样基于 G-WCR 模型求解 3.1 节浮式风电场功率优化问题时的结果，为避免所采用的 PSA 算法产生干扰，各分区算法的分区功率优化结果均取为 50 次计算的平均值，见图 8、表 5(其中， ε_p 表示分区偏差，计算方式见附录 E)，上述对比算法的详细原理可以参考对应文献。

考虑到计算时已对 PSA 算法所得结果求取多次的平均值，因而每个风向下浮式风电场区域划分准确性的不同是造成上述功率差异的主要原因。由图 8、表 5 可见，基于本文所提 FWFP-LI 算法在 0~80° 的多数风向下分区优化所得浮式风电场功率均高于其余 3 种分区算法，且与算例 4 集中优化结果

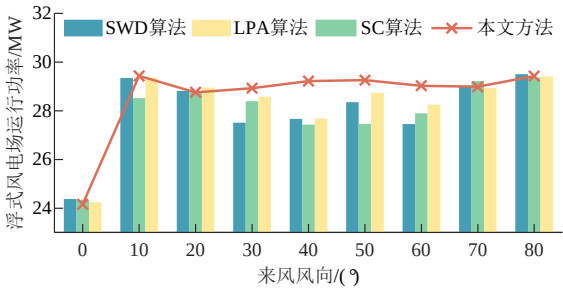


图 8 不同分区算法对浮式风电场功率优化的影响
Fig. 8 Influence on floating wind farm power optimization of different partitioning algorithms

的偏差最小，为-0.292%，表明所提 FWFP-LI 算法的分区准确性较好。

表 5 不同分区算法的对比
Table 5 Comparison of different partitioning algorithms

内容	20°		30°		40°		50°		60°	
	分区数	$\varepsilon_p/\%$	分区数	$\varepsilon_p/\%$	分区数	$\varepsilon_p/\%$	分区数	$\varepsilon_p/\%$	分区数	$\varepsilon_p/\%$
FWFP-LI(本文方法)	6	0.305	5	0.031	8	0.132	8	0.132	5	0.032
SWD	5	0.101	5	20.952	9	21.428	9	21.428	5	22.975
SC	5	0.406	5	12.645	5	30.163	5	25.932	5	10.653
LPA	5	0.406	5	14.501	9	22.177	9	10.904	5	16.125

5 结论

本文提出一种考虑位置可移动性与尾流耦合关系的浮式风电场分区功率优化方法，能够为浮式风电场的实际优化运行提供指导，助力海上风电的发展。该方法可提升浮式风电场输出功率，在提高风场功率优化问题求解效率的同时兼顾优化精度。基于包含 25 台风机的 5×5 规则布局的浮式风电场仿真结果，本文主要结论如下：

1) 在本文的主要入流风向场景下，相较于只对偏航角、轴向诱导因子进行优化，进一步考虑浮式风机位置可移动性所进行的浮式风电场功率优化能够提升约 2.443%~11.189%的风场功率；

2) 提出 G-WCR 尾流耦合关系模型，基于该模型构建所得浮式风电场稳定有向图的分区功率优化方法在本文 0~80° 风向算例范围的平均计算时间较集中式优化减少了 69.776%，分区优化方法可提高求解效率，所提 G-WCR 模型可以合理描述浮式风机的尾流耦合关系；

3) 提出 FWFP-LI 浮式风电场分区算法，在本文的浮式风电场分区功率优化问题上与现有的 SC、SWD、LPA 算法相比，具有更加准确的区域划分结果，能兼顾分区功率优化的精度。

本文重点关注主要入流风况下结合风机位置、

偏航角和轴向诱导因子的浮式风电场功率优化问题及其求解效率提升方法，但考虑到实际风况在连续的时间序列下具有一定的不确定性，因此，基于本文研究，如何在计及时间耦合关系与风力资源不确定性的同时，在连续多时间尺度情况下合理安排浮式风机位置实现浮式风电场功率优化将是后续阶段的重要研究方向。

致 谢

感谢徐衍会对文章内容的讨论和建议。

参考文献

[1] 李琦, 韩运滨, 白章, 等. 离网型风光发电联合制氢系统的协调运行策略与容量配置优化[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(20): 8136-8145.
LI Qi, HAN Yunbin, BAI Zhang, et al. Coordination operation strategy and capacity optimization of off-grid wind-solar hybrid hydrogen production system [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(20): 8136-8145(in Chinese).
[2] 夏嘉航, 王晨欣, 展瑞琦, 等. 基于主动换相型电流源换流器的远海风电并网系统[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(13): 4811-4822.
XIA Jiahang, WANG Chenxin, ZHAN Ruiqi, et al. Long-distance offshore wind power transmission system based on actively commutated current source

- converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(13): 4811-4822(in Chinese).
- [3] 刘逸凡, 许建中, 赵成勇, 等. 面向规模化海上风电场站实时仿真的精细化建模方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(19): 7648-7659.
- LIU Yifan, XU Jianzhong, ZHAO Chengyong, et al. Refined modeling method for real-time simulation of large-scale offshore wind farm stations[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(19): 7648-7659(in Chinese).
- [4] EDWARDS E C, HOLCOMBE A, BROWN S, et al. Evolution of floating offshore wind platforms: a review of at-sea devices[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2023, 183: 113416.
- [5] 李晖, 刘栋, 姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(18): 6245-6258.
- LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6258(in Chinese).
- [6] 何俊佳, 宋丽, 周本正, 等. ZnO 压敏电阻微观结构调控与性能提升研究综述[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5605-5619.
- HE Junjia, SONG Li, ZHOU Benzhen, et al. Review on microstructure control and performance improvement of ZnO varistors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5605-5619(in Chinese).
- [7] HONG Sunghun, MCMORLAND J, ZHANG Houxiang, et al. Floating offshore wind farm installation, challenges and opportunities: a comprehensive survey[J]. Ocean Engineering, 2024, 304: 117793.
- [8] DEVOY MCAULIFFE F, JUDGE F M, MURPHY J. Modelling the installation of next generation floating offshore wind farms[J]. Applied Energy, 2024, 374: 124001.
- [9] 罗魁, 郭剑波, 马士聪, 等. 海上风电并网可靠性分析及提升关键技术综述[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 3691-3702.
- LUO Kui, GUO Jianbo, MA Shicong, et al. Review of key technologies of reliability analysis and improvement for offshore wind power grid integration[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3691-3702(in Chinese).
- [10] ADARAMOLA M S, KROGSTAD P Å. Experimental investigation of wake effects on wind turbine performance [J]. Renewable Energy, 2011, 36(8): 2078-2086.
- [11] CHURCHFIELD M J, FLEMING P, BULDER B, et al. Wind Turbine wake-redirection control at the fishermen's atlantic city windfarm[R]. Golden: National Renewable Energy Laboratory, 2015.
- [12] JOHNSON K E, THOMAS N. Wind farm control: addressing the aerodynamic interaction among wind turbines[C]//Proceedings of the 2009 American Control Conference. St. Louis: IEEE, 2009: 2104-2109.
- [13] 刘一格, 赵振宙, 马远卓, 等. 基于鲸鱼优化算法的串联风力机主动尾流控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3702-3709.
- LIU Yige, ZHAO Zhenzhou, MA Yuanzhuo, et al. Active wake control strategy of tandem wind turbines based on whale optimization algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3702-3709(in Chinese).
- [14] KHEIRABADI A C, NAGAMUNE R. Real-time relocation of floating offshore wind turbine platforms for wind farm efficiency maximization: an assessment of feasibility and steady-state potential[J]. Ocean Engineering, 2020, 208: 107445.
- [15] 宋冬然, 沈旭涛, 黄朝能, 等. 基于代理模型辅助改进标准粒子群算法的浮式风电场功率优化[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(S1): 217-228.
- SONG Dongran, SHEN Xutao, HUANG Chaoneng, et al. Power optimization of floating offshore wind farm based on surrogate-assisted standard particle swarm algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(S1): 217-228(in Chinese).
- [16] SONG Dongran, SHEN Xutao, GAO Yang, et al. Application of surrogate-assisted global optimization algorithm with dimension-reduction in power optimization of floating offshore wind farm[J]. Applied Energy, 2023, 351: 121891.
- [17] BW Ideol. Floating is the future of offshore wind: solutions[EB/OL]. [2024-11-02]. <https://www.bwideol.com/en/technology>.
- [18] RODRIGUES S F, TEIXEIRA PINTO R, SOLEIMANZADEH M, et al. Wake losses optimization of offshore wind farms with moveable floating wind turbines[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 89: 933-941.
- [19] MAHFOUZ M Y, CHENG Powen. A passively self - adjusting floating wind farm layout to increase the annual energy production[J]. Wind Energy, 2023, 26(3): 251-265.
- [20] 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.
- [21] ZHANG Binbin, LIU Jun. Wind turbine clustering algorithm of large offshore wind farms considering wake effects[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2019, 2019: 6874693.
- [22] CAI Wei, HU Yang, FANG Fang, et al. Wind farm power

- production and fatigue load optimization based on dynamic partitioning and wake redirection of wind turbines[J]. *Applied Energy*, 2023, 339: 121000.
- [23] XU Jian, YI Xiankun, SUN Yuanzhang, et al. Stochastic optimal scheduling based on scenario analysis for wind farms[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017, 8(4): 1548-1559.
- [24] SHU Tong, SONG Dongran, JOO Y H. Decentralised optimisation for large offshore wind farms using a sparsified wake directed graph[J]. *Applied Energy*, 2022, 306: 117986.
- [25] SHU Tong, SONG Dongran, JOO Y H. Non-centralised coordinated optimisation for maximising offshore wind farm power via a sparse communication architecture [J]. *Applied Energy*, 2022, 324: 119705.
- [26] 杨建, 黄朝能, 宋冬然, 等. 基于两步处理的大型海上风电场分布式运行功率优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2023, 47(7): 94-104.
- YANG Jian, HUANG Chaoneng, SONG Dongran, et al. Distributed optimization method for operation power of large-scale offshore wind farm based on two-step processing[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2023, 47(7): 94-104(in Chinese).
- [27] KILINC U. Dynamic wind farm layout optimization, to find the optimal spots for movable floating offshore wind turbines through dynamic repositioning[D]. Delft: TU Delft, 2022.
- [28] HOMER J R, NAGAMUNE R. Physics-based 3-D control-oriented modeling of floating wind turbines [J]. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 2018, 26(1): 14-26.
- [29] ROALD L, JONKMAN J, ROBERTSON A, et al. The effect of second-order hydrodynamics on floating offshore wind turbines[J]. *Energy Procedia*, 2013, 35: 253-264.
- [30] HUANG Chaoneng, WANG Li, HUANG Qian, et al. Bi-level multi-objective optimization framework for wake escape in floating offshore wind farm[J]. *Applied Energy*, 2025, 377: 124712.
- [31] BASTANKHAH M, PORTÉ-AGEL F. Experimental and theoretical study of wind turbine wakes in yawed conditions[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2016, 806: 506-541.
- [32] GAO Yuansheng. PID-based search algorithm: a novel metaheuristic algorithm based on PID algorithm[J]. *Expert Systems with Applications*, 2023, 232: 120886.
- [33] RAGHAVAN U N, ALBERT R, KUMARA S. Near linear time algorithm to detect community structures in large-scale networks[J]. *Physical Review E-Statistical, Nonlinear, and Soft Matter Physics*, 2007, 76(3): 036106.

附录

<http://ntps.epri.sgcc.com.cn/djgxcb/CN/10.13334/j.0258-8013.pcsee.242574>



高飞

在线出版日期: 2025-03-11。

收稿日期: 2024-11-09。

作者简介:

高飞(2001), 男, 硕士研究生, 研究方向为新能源电力系统优化运行, seacrestcounty@163.com;

*通信作者: 艾欣(1964), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为新能源电力系统及微网, aixin@ncepu.edu.cn。

(责任编辑 马晓华, 邱丽萍)