第 51 卷 第 6 期：2819-2830 高电压技术 Vol.51, No.6: 2819-2830
2025 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241763

海上风电机组和集电网络的协调规划方法

赖 信[1,2]，林舜江[1,2]，梁宇涛[1,2]，张海龙[3]，刘明波[1,2]
（1. 华南理工大学电力学院，广州 510640；2. 广东省绿色能源技术重点实验室，广州 510630；
3. 中广核新能源(惠州)有限公司，惠州 516353）

摘 要：为了合理对海上风电场(offshore wind farm, OWF)进行规划，提高 OWF 投资和运行的经济性，需要对海上风电机组和集电网络的规划进行研究。针对采用交流并网方式的 OWF 集电系统，建立了一个以最大化 OWF 集电系统年期望利润为目标的海上风电机组和集电网络协调优化规划模型，决策变量为风电机组的位置和容量、集电网络的电压等级和拓扑连接、集电线路的容量、海上升压平台的位置和变压器容量。模型中采用考虑区域风向的尾流效应模型来准确反映不同风电机组间尾流的影响。为求解协调规划模型，采用 Benders 分解法将原混合整数非线性规划模型分解为混合整数线性规划模型的主问题和二次规划模型的子问题，通过交替迭代求解以高效获得最优协调规划方案，并提出了采用折线处理海缆交叉的方法以提高模型的求解效率。最后，对 2 个装机容量分别为 200 MW 和 1 000 MW 的实际 OWFs 算例进行分析，结果表明：与集中式求解等方法相比，所提方法具有更高的求解效率，且所得 OWF 规划方案具有更高的经济性和可靠性。

关键词：海上风电场；风机微观选址；交流集电系统；拓扑优化；Benders 分解法；折线处理海缆交叉

Coordinated Planning Approach for Offshore Wind Farm Turbines and Collection Networks

LAI Xin[1,2], LIN Shunjiang[1,2], LIANG Yutao[1,2], ZHANG Hailong[3], LIU Mingbo[1,2]
(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;
2. Guangdong Key Laboratory of Clean Energy Technology, Guangzhou 510630, China;
3. CGN New Energy(Huizhou) Co., Ltd., Huizhou 516353, China)

Abstract: In order to rationally plan offshore wind farm(OWF) and improve the economics of OWF investment and operation, it is necessary to study the planning of offshore wind farm turbines and collection networks. For the OWF collection system using AC grid-connected mode, a coordinated optimization planning model of wind turbines(WTs) and collection network is established with the goal of maximizing the annual expected profit of the OWF collection system. Meanwhile, the decision variables are the WTs' locations and capacities, the voltage level and topological connection of the collection network, the collection cable capacities, the locations of the offshore platforms and the transformer capacities. In the model, the wake effect model considering regional wind directions is used to accurately reflect the wake effect between different WTs. In order to solve the coordinated planning model, by using the Benders decomposition method, the original mixed integer nonlinear programming model is decomposed into the master problem of mixed integer linear programming model and the sub-problem of quadratic programming model; moreover, the optimal coordinated planning scheme is efficiently obtained through alternative iteration solution, and a method of using polyline to handle cross submarine cables is proposed to improve the efficiency of model solution. Finally, two practical OWFs with installed capacity of 200 MW and 1 000 MW are analyzed. The results show that, compared with the centralized solution and other methods, the proposed method has higher solution efficiency, and the obtained OWF planning scheme has higher economy and reliability.

Key words: offshore wind farm; micro-siting of wind turbines; AC electrical collection system; topology optimization; Benders decomposition method; polyline for handling cross submarine cable

基金资助项目：广东省基础与应用基础研究基金(2024B1515250007；2023A1515240075)；广东省重点领域研发计划(2021B0101230004)。
Project supported by Guangdong Basic and Applied Basic Research Foundation(2024B1515250007, 2023A1515240075), Key Research and Development Project of Guangdong Province(2021B0101230004).

0 引言

海上风电具有大规模开发可行性高、资源丰富、发电利用小时数较大等优点，近年来在我国得到了快速发展[1-2]。根据风能资源普查结果，我国离岸距离 200 km 的海上风能资源技术可开发量达到 27.8 亿 kW，而现有开发利用率不足 1.1%，未来开发潜力巨大[3]。海上风电场(offshore wind farm, OWF)的风电机组和集电网络是海上风电集电系统的重要组成部分，为了提高 OWF 集电系统的投资和运行的经济效益，对 OWF 机组和集电网络进行协调优化规划具有重要意义。

OWF 一般具有 20~25 年的项目周期，建设投资巨大，需要合理规划风电场的建设方案以达到更好的经济性[4]。风机间的尾流效应是确定各风机相对位置的主要因素之一，因此，尾流模型的合理性将直接影响 OWF 的风机布置和发电效益。目前，国内外一些学者已对OWF的尾流模型进行了研究。文献[5]在质量和动量守恒定理的基础上，提出了速度亏损为高斯分布的尾流模型；文献[6]提出了考虑 OWF 内部平均湍流强度和直接尾流湍流强度的计算模型；文献[7]提出了 Park 模型描述风机间的尾流损耗并将其应用到风能资源评估软件中。然而，以上模型均为单个风向下的尾流线性扩张模型，与实际OWF中风速具有多个方向的情况存在一定差异，可能会导致其获得的风机位置和发电效益无法达到最优状态。

此外，国内外一些学者对 OWF 集电系统的优化规划问题也开展了研究，包括风电机组、集电网络和升压站的规划。在风电机组规划方面，文献[8]采用贪婪算法研究不同高度风电机组的布局优化问题；文献[9]采用随机搜索算法对风机的数量、位置和类型进行优化；文献[10]构建了考虑位置固定时多类型风电机组的 OWF 中风机容量优化模型。在集电网络规划方面，文献[11]考虑了各类电气元件投资成本对 OWF 集电系统电缆连接的影响；文献[12]建立了考虑新型双边环形的交流集电系统多目标优化模型；文献[13]提出采用 66 kV 或更高电压等级的 OWF 集电系统汇集方案以降低集电系统的成本；文献[14]结合模糊 C 均值聚类(fuzzy C-means, FCM)算法和普里姆(Prim)算法优化不同电压等级下的集电系统拓扑结构；文献[15]基于潮流和可靠性的线性化分析，对 OWF 集电系统的经济性和可靠性进行集中式拓扑优化；文献[16]提出了一种考虑海缆实际载流量的含多升压站的海上风电场集电网络拓扑优化模型；文献[17]提出了一种基于大语言模型辅助的大型海上风电场集电网络拓扑优化方法。在升压站规划方面，文献[18]采用模式搜索法对 OWF 升压平台的位置进行优化；文献[19]针对多个海上升压站的优化规划模型，提出了基于 Q 学习粒子群算法的求解策略。然而，上述文献研究只针对 OWF 集电系统中的某些组成部分进行优化，且假定其他部分已知，例如，集电网络规划就假定风机的布点和型号已知，未能全面考虑风电机组的布点和选型、集电网络拓扑和海缆选型及电压等级、升压平台选址定容以进行整个 OWF 集电系统各部分协调优化。OWF 集电系统整体协调规划是一个复杂的优化问题，其投资经济性、拓扑连接和潮流分布都是紧密耦合的，因此有必要对 OWF 集电系统整体协调优化规划问题进行深入研究。

鉴于此，本文提出一种考虑区域风向尾流效应的海上风电机组和集电网络的协调规划方法。建立了以最大化 OWF 年期望利润为目标的协调优化规划模型，对 OWF 集电系统中各电气部分的布点和容量进行优化。提出了一种折线处理交叉约束的优化方法，并采用 Benders 分解法将原混合整数非线性规划(mixed integer nonlinear programming, MINLP)模型分解成混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)模型的主问题和二次规划(quadratic programming, QP)模型的子问题，通过交替迭代求解以高效获得协调优化规划方案。

1 考虑区域风向的尾流模型

当风能经过海上风电机组时，一部分风动能传递到风电机组的转子转换成电能，同时风机叶片对风速有一定的阻挡作用，导致下游区域风电机组的发出功率减少，这就是尾流效应。可采用 Jensen 模型来描述尾流效应[20]，如式(1)、(2)所示，Jensen 尾流效应的示意图如图 1 所示。

$$\lambda_{i,j,t}=(1-\sqrt{1-c_{\mathrm{T}}})(D_t/(D_t+2r\tan\alpha))^2 \tag{1}$$

$$c_{\mathrm{T}}=2T/(\rho v_i^2 A) \tag{2}$$

式中：$\lambda_{i,j,t}$为尾流衰减系数，表示 t 型号风机 i 对风机 j 的尾流影响程度；D_t为 t 型号风机的叶片直径；r 为 2 个风机之间沿风向的径向距离；c_{T}为推力系数；α 为风机尾迹角；T 为轴向推力；ρ 为空气密度；v_i为风机 i 处的风速；A 为风电机叶片扫过的面积。

然而，Jensen 模型计算得到的尾流损耗比实际情况偏小[21]。为了减少与实际情况差异带来的计算误差，在 Jensen 模型的基础上提出了考虑区域风向的尾流模型。由于实际运行中风向分布具有多方向、多角度的特点，因此将可能的风向分成 K 个扇形区域，每个扇形区域对应的弧度角为 $\mu=2\pi/K$。假设在同一个扇区内，任何特定的风向都是等概率的，定义风向 d 为扇形区域里统计上的预期风向，并且该方向是该扇区的角平分线所在的方向。对于该区域里的特定点，扇区中存在一系列的风向角，这些风向角的尾流区域包括该点，定义这一系列风向角的角度与 μ 的比值为节点 i 对节点 j 的风强干扰因子，用 Ψ_{ij} 表示，Ψ_{ij} 的取值范围是[0, 1]，其取值大小取决于风机间的位置关系，如图 2 所示。

图 2 中可将尾流干扰区划分成 4 个不同区域，需分别对不同区域的 $\Psi_{i,j}$ 进行计算，如下：

$$\begin{cases}\Psi_{ij}^{\mathrm{A}}=\begin{cases}\dfrac{1}{\mu}\left(\dfrac{\mu}{2}+\xi+\theta_{ij}\right),\ \omega\le\theta_{ij,\mathrm{c}}\le\pi-\omega,\ k_{ij,\mathrm{up}}\le\tan\delta\\ \dfrac{1}{\mu}\left(\dfrac{\mu}{2}+\xi-\theta_{ij}\right),\ \omega-\pi\le\theta_{ij,\mathrm{c}}\le-\omega,\ k_{ij,\mathrm{lo}}\ge\tan\delta\end{cases}\\ \Psi_{ij}^{\mathrm{B}}=2\xi(r)/\mu,\quad -\omega\le\theta_{ij,\mathrm{c}}\le\omega\\ \Psi_{ij}^{\mathrm{C}}=1,\quad \pi-\omega\le\theta_{ij,\mathrm{c}}\le\pi+\omega\\ \Psi_{ij}^{\mathrm{D}}=0,\quad k_{ij,\mathrm{up}}\ge\tan\delta\ \text{或}\ k_{ij,\mathrm{lo}}\le\tan(-\delta)\end{cases}\tag{3}$$

其中：

$$\xi=\alpha+\arcsin\left(D_t\cos\alpha/(2r_{ij})\right)\tag{4}$$

$$\begin{cases}\omega=\mu/2-\alpha\\ \delta=\mu/2+\alpha\end{cases}\tag{5}$$

$$\begin{cases}k_{ij,\mathrm{up}}=\dfrac{y_j-(y_i+D_t/2)}{x_j-x_i}\\ k_{ij,\mathrm{lo}}=\dfrac{y_j-(y_i-D_t/2)}{x_j-x_i}\end{cases}\tag{6}$$

$$r_{\mathrm{c}}=D_t\cos\alpha/(2\sin(\mu/2-\alpha))\tag{7}$$

式中：r_{ij} 和 θ_{ij} 为坐标 j 相对坐标 i 的极坐标；r_{c} 为线段|OC|的长度；$\theta_{ij,\mathrm{c}}$ 为坐标 j 相对点 C 的角度；$k_{ij,\mathrm{up}}$、$k_{ij,\mathrm{lo}}$ 分别为坐标 j 与坐标 i 上、下端点连线的斜率；y_j、y_i 分别为坐标 j 和坐标 i 的纵坐标；x_j、x_i 分别为坐标 j 和坐标 i 的横坐标。

对于多风向情景的尾流效应，提出尾流损耗因子来描述 t 型号风机 i 对风机 j 的综合尾流影响，其表达式为：

$$\sigma_{i,j,t}=\sum_{k=1}^{K}\left(\Psi_{ij}^{k}\lambda_{i,j,t}^{k}p^{k}\right)\tag{8}$$

式中：$\sigma_{i,j,t}$ 为尾流损耗因子，表示综合多个风向场景下 t 型号的风机 i 对风机 j 的尾流影响程度；$i_{i,j,t}^{k}$ 为风向场景 k 的尾流衰减系数；p^{k} 为风向场景 k 发生的概率；K 为风向场景总数。

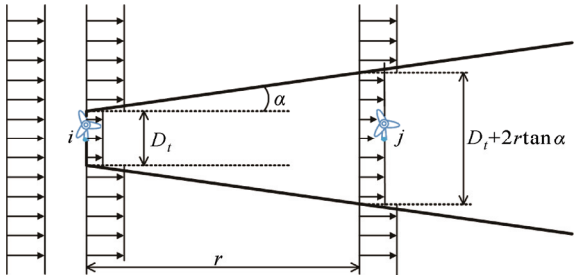


图 1　Jensen 尾流模型示意图

Fig.1　Schematic of Jensen wake model

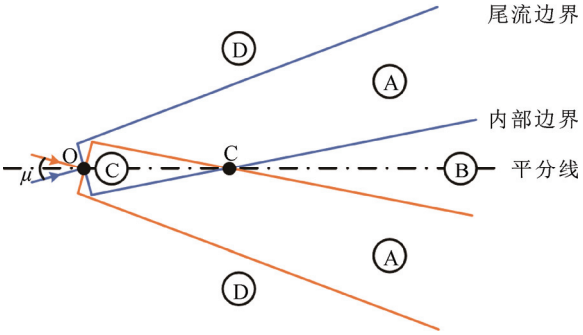


图 2　考虑区域风向的尾流效应示意图

Fig.2　Diagram of wake effect considering regional wind directions

2　海上风电机组和集电网络协调规划模型

交流并网方式 OWF 的基本结构如图 3 所示，OWF 集电系统包括风电机组、交流集电网络和海上升压平台。本文研究的 OWF 集电系统优化规划问题的主要优化对象包括：风电机组的安装位置和容量，集电网络的拓扑连接和电缆型号及电压等级，海上升压平台的数量和容量，平台内部升压变压器的数量和型号，接入海上升压平台的馈线数量。OWF 集电系统的整体协调规划是一个复杂的优化问题，因此，结合国内外的实际工程情况，先对此问题做一些简化和假设：(1)一个 OWF 内部集电网络所有元件的电压等级是一样的；(2)风电机组待选安装位置和海上升压平台候选站址是根据现场实际环境和空气动力学来确定的；(3)集电网络的海缆连接为放射型拓扑结构。

2.1　目标函数

所建立的海上风电机组和集电网络的协调优

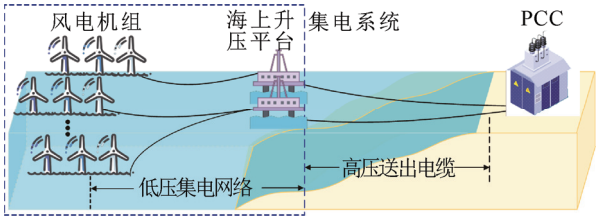


图 3 交流并网海上风电场的结构图

Fig.3 Structure of AC grid-connected offshore wind farm

化规划模型以 OWF 的年期望利润最大化为目标，对风电机组、集电电缆和海上升压平台进行协调优化。年期望利润为年期望收益减去年等值投资成本、年运行网损成本和等值故障损失成本，即：

$$\max f = C_{\text{rev}} - (C_{\text{wt}} + C_{\text{cb}} + C_{\text{st}})A_0 - C_{\text{loss}} - C_{\text{eens}} \tag{9}$$

$$\begin{cases} C_{\text{rev}} = T_{\text{y}} c_{\text{e}} \Delta T \sum\limits_{i\in\Omega_{\text{w}},t\in\Omega_{\text{T}}} P_{\text{wi},t} \\ C_{\text{wt}} = \sum\limits_{i\in\Omega_{\text{w}},t\in\Omega_{\text{T}}} m_{i,t} P_{t\text{N}} c_t \\ C_{\text{cb}} = \sum\limits_{i,j\in\Omega_{\text{bwf}},b\in\Omega_{\text{B}}} m_{i,j,b} d_{i,j} c_b \\ C_{\text{st}} = \sum\limits_{s\in\Omega_{\text{S}}} z_s c_s + C_{\text{SG}} + C_{\text{p}} \\ C_{\text{loss}} = T_{\text{y}} c_{\text{e}} \Delta T \sum\limits_{\substack{i,j\in\Omega_{\text{owf}},\\ b\in\Omega_{\text{B}}}} d_{i,j} m_{i,j,b} R_b (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \\ C_{\text{eens}} = c_{\text{e}} W_{\text{eens}} \\ A_0 = r_0(1+r_0)^{T_{\text{a}}} / ((1+r_0)^{T_{\text{a}}} - 1) \end{cases} \tag{10}$$

式中：f 为风电场年期望利润值；C_{rev} 为风电场年期望收益；C_{wt}、C_{cb} 和 C_{st} 分别为风机、集电网络电缆和海上升压平台的投资成本；A_0 为现值-年值转换系数；r_0 为折现率，取 5%；C_{loss} 为汇集系统年运行网损成本；C_{eens} 为年等值故障损失成本；T_{a} 为海上风电场项目运行周期，一般取 25 年；ΔT 为单位时段，取 1 h；T_{y} 为 1 年包含的小时数，取 8 760 h；c_{e} 为上网电价，本文取 0.5 元/kWh；W_{eens} 为年等值故障损失电量；$P_{\text{wi},t}$ 为节点 i 处 t 型号风机发出的有功功率；$m_{i,t}$ 为风电机组选址选型变量，取“1”表示在节点 i 安装 t 型号风机，取“0”表示没安装；$P_{t\text{N}}$ 表示 t 型号风机的额定有功功率；c_t 为 t 型号风机的单位容量造价；$m_{i,j,b}$ 为海缆连接选型变量，取“1”表示在节点 i 和 j 之间连接有 b 型号海缆，取“0”表示没连接；$d_{i,j}$ 为节点 i 和 j 之间的距离；c_b 为 b 型号海缆的单位长度造价；R_b 为 b 型号海缆的单位长度电阻；P_{ij}、Q_{ij} 分别为交流海缆 ij 的有功、无功功率；Ω_{w}、Ω_{owf} 分别为风机节点、海上风电场所有节点的集合；Ω_{T}、Ω_{B} 和 Ω_{S} 分别为风机类型、海缆类型和变压器类型的集合；z_s 为 s 型号变压器的数量；c_s 为 s 型号变压器的单台造价；C_{SG} 为接入海上升压平台线路的总开关设备成本；C_{p} 为海上升压平台的建造成本。

2.2 风电机组选址和定容约束

风电机组选址和定容约束包括 OWF 总装机容量约束和机组尾流损耗约束。一个 OWF 的总装机容量通常为政府核准批复的已知值，但由于各型号风机的额定功率 $P_{t\text{N}}$ 为离散取值，且风机台数为正整数，导致 OWF 实际总装机容量与政府核准批复值往往会有点偏差。因此，OWF 实际总装机容量约束可描述为：

$$P_{\text{sum}} = \sum_{i\in\Omega_{\text{w}}} m_{i,t} P_{t\text{N}} \tag{11}$$

$$(1-B)p_{\text{g}} \le P_{\text{sum}} \le (1+B)p_{\text{g}} \tag{12}$$

式中：P_{sum} 为 OWF 的实际总装机容量；p_{g} 为政府核准批复的 OWF 的规划总装机容量；B 为允许的容量偏差系数，取 1%。

根据 OWF 所规划建设海域的实际历史风速数据，将风向分为北、东北、东、东南、南、西南、西和西北 8 个风向情景，以各个情景对应的全年的小时级风速数据作为风机的流入风速，则各个情景下单台风机的理论发电功率可表示为：

$$P_{t,k,\tau} = \begin{cases} 0, & v_{k,\tau} < v_{\text{ci}} \\ \rho\pi(D_t/2)^2 v_{k,\tau}^3 C_{\text{pg},t}/2, & v_{\text{ci}} \le v_{k,\tau} \le v_{\text{rated}} \\ P_{t\text{N}}, & v_{\text{rated}} \le v_{k,\tau} \le v_{\text{co}} \end{cases} \tag{13}$$

$$P_{t,k} = \sum_{\tau=1}^{T_{\text{y}}} P_{t,k,\tau} \Delta T / T_{\text{y}} \tag{14}$$

式中：$P_{t,k}$ 为风向情景 k 下 t 型号风机的理论发电功率；$P_{t,k,\tau}$ 为风向情景 k 下 t 型号风机在全年第 τ 个时段的发电功率；$C_{\text{pg},t}$ 为 t 型号风机的风能利用系数；ρ 为空气密度；$v_{k,\tau}$ 为情景 k 下全年第 τ 个时段风机的流入风速；v_{ci}、v_{rated} 和 v_{co} 分别为风机切入、额定和切出风速。

在实际 OWF 中，各风电机组之间由于尾流效应产生一定的输入机械功率损失，即风电机组的实际发电功率要小于理论值，采用大 M 法描述考虑选址不确定性下风电机组的发电功率，即：

$$P_t = \sum_{k=1}^{K} p_k P_{t,k} \tag{15}$$

$$a_i = \sum_{j\in\Omega_{\text{w}}} m_{j,t} \sigma_{j,i,t} \tag{16}$$

$$\begin{aligned} (1-a_i)P_t - M(1-m_{i,t}) \le P_{\text{wi},t} \le \\ (1-a_i)P_t + M(1-m_{i,t}),\ i \in \Omega_{\text{w}} \end{aligned} \tag{17}$$

$$-Mm_{i,t} \le P_{\text{wi},t} \le Mm_{i,t},\ i \in \Omega_{\text{w}} \tag{18}$$

$$n_i=\sum_{t\in\Omega_{\mathrm{T}}}m_{i,t},\ n_i\in\{0,1\} \tag{19}$$

$$-P_{\mathrm{wi},t}\tan\varphi_{\mathrm{wm}}\le Q_{\mathrm{wi},t}\le P_{\mathrm{wi},t}\tan\varphi_{\mathrm{wm}} \tag{20}$$

式中：P_t 为 t 型号风机的理论发电功率；p_k 为风向情景 k 出现的概率；a_i 为风机 i 的功率损耗比，与 OWF 中其他风机的类型和选址位置有关；M 为一个很大的正数；n_i 为节点 i 是否安装风机的二进制变量；$Q_{\mathrm{wi},t}$ 为节点 i 处 t 型号风机发出的无功功率；φ_{wm} 为风机运行的最大功率因数角。

2.3　集电网络电压等级选择约束

目前，实际 OWF 交流集电网络的电压等级有 35 kV 和 66 kV 2 种，假定 1 个 OWF 的集电网络电压等级只能从其中选择 1 个。引入 2 个二进制变量 V_{N35} 和 V_{N66}，若 V_{N35}=1 且 V_{N66}=0，表示 OWF 的交流集电网络采用 35 kV 的电压等级；若 V_{N66}=1 且 V_{N35}=0，则表示 OWF 的交流集电网络采用 66 kV 的电压等级。并加入以下约束：

$$V_{\mathrm{N35}}+V_{\mathrm{N66}}=1 \tag{21}$$

$$\begin{cases}m_{i,t}=m_{i,t_{35}}+m_{i,t_{66}}\\ m_{i,t_{35}}\le MV_{\mathrm{N35}}\\ m_{i,t_{66}}\le MV_{\mathrm{N66}}\\ t_{35}\in\Omega_{\mathrm{T35}},\ t_{66}\in\Omega_{\mathrm{T66}}\end{cases} \tag{22}$$

$$\begin{cases}m_{i,j,b}=m_{i,j,b_{35}}+m_{i,j,b_{66}}\\ m_{i,j,b_{35}}\le MV_{\mathrm{N35}}\\ m_{i,j,b_{66}}\le MV_{\mathrm{N66}}\\ b_{35}\in\Omega_{\mathrm{B35}},\ b_{66}\in\Omega_{\mathrm{B66}}\end{cases} \tag{23}$$

式中：$m_{i,t35}$ 和 $m_{i,t66}$ 分别为 35 kV 和 66 kV 风电机组选址选型的二进制变量；$m_{i,j,b35}$ 和 $m_{i,j,b66}$ 分别为 35 kV 和 66 kV 海缆连接选型的二进制变量；Ω_{T35} 和 Ω_{T66} 分别为 35 kV 和 66 kV 风机类型集合；Ω_{B35} 和 Ω_{B66} 分别为 35 kV 和 66 kV 海缆类型集合。

2.4　集电网络海缆连接和容量约束

2.4.1　海缆连接约束

对于 OWF 交流集电系统，采用典型的放射形集电网络拓扑结构，风电机组发出的功率通过交流海缆汇集输送到海上升压站。对于放射形拓扑的集电网络优化问题，可将集电系统中风电机组和海上升压站的坐标看成一张有向图[22]，图里 2 个节点之间连线为有向弧，海上升压站节点为放射形结构的树根节点，则电缆连接约束可表示为式(24)—(29)。其中，式(24)引入了二进制变量 $n_{i,j}$，表示 2 个节点之间只能铺设 1 条海缆；式(25)和式(26)表示集电网络为放射形结构，规定只有 1 条海缆从风机节点引出，且升压站节点无引出集电海缆；式(27)表示接入海上升压站的集电海缆串数限制；式(28)和式(29)表示只允许在安装有风机的节点之间铺设电缆。

$$n_{i,j}=\sum_{b\in\Omega_{\mathrm{B}}}m_{i,j,b} \tag{24}$$

$$\sum_{j\in\Omega_{\mathrm{w}},i\ne j}n_{i,j}=n_i \tag{25}$$

$$\sum_{i\in\Omega_{\mathrm{s}}}n_{i,j}=0 \tag{26}$$

$$\sum_{i\in\Omega_{\mathrm{w}},\,j\in\Omega_{\mathrm{s}}}n_{i,j}\le N_{\mathrm{MS}} \tag{27}$$

$$-n_i\le m_{i,j,b}\le n_i,\forall i,j\in\Omega_{\mathrm{w}} \tag{28}$$

$$-n_j\le m_{i,j,b}\le n_j,\forall i,j\in\Omega_{\mathrm{w}} \tag{29}$$

式中：二进制变量 $n_{i,j}$ 表示节点 i 和 j 是否连接海缆，取“1”表示在节点 i 和 j 之间连接有海缆，取“0”表示没连接；N_{MS} 为接入海上升压站集电海缆的最大串数；Ω_{s} 为海上升压站节点的集合。

2.4.2　海缆交叉规避约束

OWF 集电网络的拓扑中应避免出现海缆交叉的情况，这是因为海缆交叉需要使用价格昂贵的桥梁结构，该结构会减少电缆的容量并大幅降低海缆运行的可靠性，电缆交叉规避约束为：

$$n_{i,j}+n_{j,i}+n_{h,l}+n_{l,h}\le 1,\ (i,j)\&(h,l)\in S \tag{30}$$

式中：S 为所有可能发生相交的 2 个有向弧(i,j)和(h,l)的集合。

2.4.3　海缆容量约束

要求集电网络中海缆流过的功率不大于该型号海缆的额定载流量，海缆容量约束为：

$$P_{ij}/\cos\varphi_{ij}\le\sum_b\sqrt{3}U_{\mathrm{N}}I_{\mathrm{N},b}m_{i,j,b},\ i,j\in\Omega_{\mathrm{owf}} \tag{31}$$

式中：U_{N} 为额定电压；$I_{\mathrm{N},b}$ 为 b 类型海缆的载流量；φ_{ij} 为线路 ij 的功率因数角。

2.5　交流集电网络的潮流约束

对于放射形拓扑结构的集电网络，在近似线性交流潮流方程[23]的基础上加入拓扑连接变量，得到交流集电网络的潮流约束为：

$$\begin{cases}P_{\mathrm{wi},t}=\sum_j P_{ij}-\sum_k P_{ki}\\ Q_{wi,t}=\sum_j Q_{ij}-\sum_k Q_{ki}\end{cases},\ i,j,k\in\Omega_{\mathrm{owf}} \tag{32}$$

$$-M(1-m_{i,j,b})\le P_{ij}-d_{i,j}(G_b(U_i-U_j)-B_b(\theta_i-\theta_j))\le M(1-m_{i,j,b}),\quad i,j\in\Omega_{\mathrm{owf}} \tag{33}$$

$$-M(1-m_{i,j,b})\le Q_{ij}+d_{i,j}(B_b(U_i-U_j)+G_b(\theta_i-\theta_j))\le M(1-m_{i,j,b}),\quad i,j\in\Omega_{\mathrm{owf}} \tag{34}$$

$$P_{ij} \le Mn_{i,j},\ i,j \in \Omega_{\text{owf}} \tag{35}$$

$$Q_{ij} \le Mn_{i,j},\ i,j \in \Omega_{\text{owf}} \tag{36}$$

$$1.0 \le U_i \le 1.05,\ i \in \Omega_{\text{w}} \tag{37}$$

$$U_i = 1.0,\ \theta_i = 0,\ i \in \Omega_{\text{s}} \tag{38}$$

式中：P_{jk}、Q_{jk}分别为交流海缆 jk 的有功、无功功率；U_i和 θ_i分别为节点 i 处的电压幅值和相角；G_b和 B_b分别为 b 类型交流海缆的单位长度电导和电纳。

2.6 OWF 集电系统的可靠性约束

采用年等值故障损失电量 W_{eens}作为OWF集电系统可靠性的评价指标，包括年等值风机故障损失电量和年等值电缆故障损失电量，考虑 OWF 集电系统中单个元件发生故障的情形，则可靠性约束为：

$$W_{\text{eens}} = W_{\text{eens,wt}} + W_{\text{eens,cb}} \tag{39}$$

$$W_{\text{eens,wt}} = \sum_{i \in \Omega_{\text{w}}} P_{\text{eens}i} \lambda_{\text{wt}} T_{\text{mttr,wt}} \tag{40}$$

$$W_{\text{eens,cb}} = \sum_{i,j \in \Omega_{\text{owf}}} P_{\text{eens}i,j} \lambda_{\text{cb}} T_{\text{mttr,cb}} \tag{41}$$

式中：$W_{\text{eens,wt}}$和 $W_{\text{eens,cb}}$分别为年等值风机和海缆故障损失电量；$P_{\text{eens}i}$为节点 i 处风机故障的损失功率；$P_{\text{eens}i,j}$为节点 i 和 j 之间海缆故障的损失功率；λ_{wt}为风机的失效率，取 1.5 次/年；λ_{cb}为海缆的失效率，取 0.015 次/年；$T_{\text{mttr,wt}}$为风机故障的平均修复时间，取 490 h；$T_{\text{mttr,cb}}$为海缆故障的平均修复时间，取 1 440 h[24]。

2.7 海上升压平台变压器容量约束

OWF 中海上升压平台的变压器组总容量应不小于 OWF 的实际总装机容量，即：

$$S_i = \sum_{s \in \Omega_{\text{S}}} S_{s,\text{N}} z_{i,s} \cos\varphi_s, i \in \Omega_{\text{s}} \tag{42}$$

$$z_{i,s} \le Mn_{si}, i \in \Omega_{\text{s}} \tag{43}$$

$$\sum_{i \in \Omega_{\text{s}}} S_i \ge P_{\text{sum}} \tag{44}$$

$$C_{\text{SG}} = c_{\text{sg}} \sum_{i,j} n_{i,j},\ i \in \Omega_{\text{w}}, j \in \Omega_{\text{s}} \tag{45}$$

式中：S_i为节点 i 海上升压平台中变压器的总额定容量；$S_{s,\text{N}}$为 s 型号变压器的额定容量；$z_{i,s}$为节点 i 海上升压平台中 s 型号变压器的数量；φ_s为海上升压站的功率因数角；二进制变量 n_{si}表示是否在待选点 i 处构建海上升压平台；C_{SG}为连接海上升压平台的海缆的开关设备成本；c_{sg}为单个开关设备成本[25]。

综上，以式(9)、(10)为目标函数，式(1)—式(8)和式(11)—式(45)为约束条件，建立海上风电机组和集电网络的协调优化规划模型。然而，由于该优化模型为包含大量离散变量和非线性约束的 MINLP 模型，直接求解难度大，且计算效率低，因此提出以下高效求解算法。

3 模型求解

针对上述协调规划的 MINLP 模型，采用 Benders 分解法将模型分解成 MILP 模型的主问题和 QP 模型的子问题交替迭代求解，以实现对协调规划模型的高效求解[26]。

3.1 Benders 分解法

由于含有大量离散变量，因此所提出协调规划模型的计算复杂度会随着 OWF 规模和待选点数量的增加呈指数级增长，进而使得对模型直接求解需耗费大量时间。Benders 分解算法是一种求解大规模含离散变量优化问题的有效算法，通过将原问题分解为规模较小的离散优化主问题和连续优化子问题的交替迭代求解来逐步逼近原问题的最优解，从而提高模型求解的计算速率。

在 OWF 机组和集电网络协调优化模型中，只有网损计算部分存在连续决策变量，其他部分的决策变量都为整数变量，因此，可通过 Benders 分解法将此模型分解为含连续变量的子问题式(46)和含整数变量的主问题式(47)。

$$\begin{cases} \min(f_{\text{sub}}) = C_{\text{loss}} = T_y c_{\text{e}} \Delta T \sum\limits_{i,j \in \Omega_{\text{owf}}, b \in \Omega_{\text{B}}} d_{i,j} \bar{m}_{i,j,b} R_b (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) \\ \text{s.t.} \begin{cases} \bar{P}_{\text{wi},t} = \sum\limits_j P_{ij} - \sum\limits_k P_{ki}, \bar{Q}_{wi,t} = \sum\limits_j Q_{ij} - \sum\limits_k Q_{ki}, i \in \Omega_{\text{w}}, j,k \in \Omega_{\text{owf}} \\ -M(1-\bar{m}_{i,j,b}) \le P_{ij} - d_{i,j}(G_b(U_i - U_j) - B_b(\theta_i - \theta_j)) \le M(1-\bar{m}_{i,j,b}) \\ -M(1-\bar{m}_{i,j,b}) \le Q_{ij} + d_{i,j}(B_b(U_i - U_j) + G_b(\theta_i - \theta_j)) \le M(1-\bar{m}_{i,j,b}) \\ P_{ij} \le M\bar{n}_{i,j},\ i,j \in \Omega_{\text{owf}} \\ Q_{ij} \le M\bar{n}_{i,j},\ i,j \in \Omega_{\text{owf}} \\ 1.0 \le U_i \le 1.05,\ i \in \Omega_{\text{w}} \\ U_i = 1.0, \theta_i = 0,\ i \in \Omega_{\text{s}} \end{cases} \end{cases} \tag{46}$$

式中：$\bar{P}_{\text{wi},t}$、$\bar{Q}_{\text{wi},t}$、$\bar{m}_{i,j,b}$和 $\bar{n}_{i,j}$分别为主问题求解后传递过来的已知量。

$$\begin{cases} \min(-f_{\text{m}}) = A_0(C_{\text{wt}} + C_{\text{cb}} + C_{\text{st}}) - C_{\text{rev}} + z \\ \text{s.t.} \begin{cases} z \ge \bar{C}_{\text{loss}} + \sum\limits_i d_{1i}(P_{\text{wi},t} - \sum\limits_{j \in \Omega_{\text{owf}}} \bar{P}_{ij} + \sum\limits_{k \in \Omega_{\text{w}}} \bar{P}_{ki}) + \\ \qquad \sum\limits_i d_{2i}(Q_{wi,t} - \sum\limits_{j \in \Omega_{\text{owf}}} \bar{Q}_{ij} + \sum\limits_{k \in \Omega_{\text{w}}} \bar{Q}_{ki}) + \\ \sum\limits_{i,j} d_{3(i,j)}(\bar{P}_{ij} - d_{i,j}(G_b(\bar{U}_i - \bar{U}_j) - B_b(\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_j)) - M(1-m_{i,j,b})) + \\ \sum\limits_{i,j} d_{4(i,j)}(\bar{Q}_{ij} + d_{i,j}(B_b(\bar{U}_i - \bar{U}_j) + G_b(\bar{\theta}_i - \bar{\theta}_j)) - M(1-m_{i,j,b})) + \\ \qquad \sum\limits_{i,j} d_{5(i,j)}(\bar{P}_{ij} - Mn_{i,j}) + \sum\limits_{i,j} d_{6(i,j)}(\bar{Q}_{ij} - Mn_{i,j}) \\ \text{式(1)—式(8)、式(10)—式(32)、式(40)—式(45)} \end{cases} \end{cases} \tag{47}$$

式中：z 为引入的辅助变量；$\bar{C}_{\text{loss}}$、$\bar{P}_{ij}$、$\bar{Q}_{ij}$、$\bar{U}_i$和 $\bar{\theta}_i$分别为子问题求解后传递过来的已知量；d_{1i}、d_{2i}、$d_{3(i,j)}$、$d_{4(i,j)}$、$d_{5(i,j)}$、$d_{6(i,j)}$分别为子问题(46)中前 6 个

约束对应的对偶变量，d_{1i} 和 d_{2i} 对应每个节点都有 1 个对偶变量，$d_{3(i,j)}$等则对应每个线路都分别有 1 个对偶变量，这些对偶变量都是子问题求解后传递过来的已知量。

可以看到，子问题式(46)为 QP 问题，主问题式(47)为 MILP 问题，都可以调用 GAMS 软件里的 GUROBI 求解器进行高效求解。Benders 分解法求解协调规划模型步骤如下所述。

1）初始化。初始化目标函数下界 $L_B=-\infty$，上界 $U_B=+\infty$，迭代次数 $v=1$。

2）求解子问题。调用求解器求解子问题得到最优目标函数 f_{sub} 和对偶变量 d_{1i}、$d_{2(i,j)}$、$d_{3(i,j)}$、$d_{4(i,j)}$、$d_{5(i,j)}$和 $d_{6(i,j)}$，更新上界 $U_B=f_{sub}$。

3）求解主问题。调用求解器求解主问题得到最优目标函数 f_m 和离散变量的解，更新下界 $L_B=f_m$。

4）收敛性判断。若 $|U_B-L_B|\le\varepsilon$(ε 为给定的收敛精度阈值)，则算法收敛，输出本次求解结果，否则更新迭代次数 $v=v+1$，返回步骤 2)。

3.2　折线处理海缆交叉的方法

由于模型中海缆交叉规避约束式(30)的计算复杂度为 $O(n^3)$，其中 n 表示 OWF 集电系统中待选点的数量，随着 OWF 规模的增大，风机和电缆的数量增多，式(30)的数目巨大，求解协调规划模型所需的时间会大大增加。为提高模型求解的计算效率，提出了一种采用折线处理海缆交叉规避约束的方法。为了消除海缆交叉现象，考虑在集电网络拓扑连接中加入折线来替代可能出现的交叉海缆。先在优化模型中忽略约束式(30)，求解得到存在海缆相交点的集点网络拓扑；接着，通过将海缆相交点附近的某个风机位置作为可能的转折点，海缆在此风机位置处改变方向，形成折线，从而可以消除交叉现象。并且，由于计算中去掉了海缆交叉规避约束，优化模型的可行域范围扩大，可求解得到经济性更优的计算结果，尽管折线处理会稍微增加海缆成本，但对比含海缆交叉规避约束的优化规划模型，仍可以提高获得的 OWF 规划方案的经济性。

折线连接会使所需的海缆长度增加，海缆总成本也有所增加，即：

$$\Delta z=(d_{i,k}+d_{k,j}-d_{i,j})c_b m_{i,j,b} \tag{48}$$

式中：k 为转折节点；Δz 为海缆成本增量，表示电缆(i,j)变为折线(i,k,j)所增加的海缆成本。

采用该方法的具体计算步骤如下所述。

1）初始化：给定交叉海缆集合 $G=\varnothing$，根据待选风电机组节点坐标位置得到集合 S，令 $\Delta z=0$。

2）求解不含海缆交叉规避约束式(30)的海上风电机组和集电网络协调优化规划模型得到海缆连接集合 N^*，求出交叉海缆集合 $G=N^*\cap S$。

3）连线型相交点检验及折线处理：若存在交叉海缆满足式(49)，此时海缆(i,j)和海缆(h,l)相交且节点 j 与节点 l 相互连接，如图 4(a)所示，选取距离海缆相交点最近的风机节点作为转折节点 k，以得到折线(i,k,j)，计算 Δz_1，令 $\Delta z=\Delta z+\Delta z_1$。

$$\begin{cases}(n_{i,j},n_{h,l})\in G\\ n_{l,j}+n_{j,l}=1\end{cases} \tag{49}$$

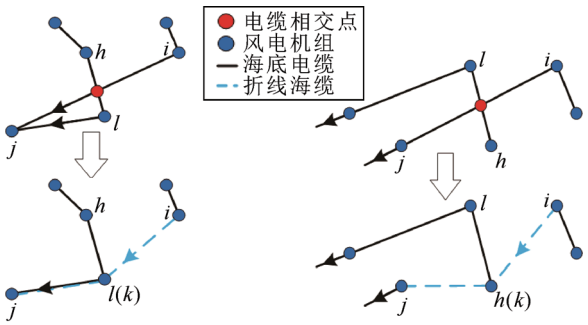
4）节点型相交点检验及折线处理：若存在交叉海缆满足式(50)，此时相交海缆的节点中存在集电网络的叶节点，如图 4(b)所示，选取距离海缆相交点最近的叶节点风机作为转折节点 k，得到折线(i,k,j)，计算 Δz_2，令 $\Delta z=\Delta z+\Delta z_2$。

$$\begin{cases}(n_{i,j},n_{h,l})\in G\\ \sum\limits_{a\in\Omega_{wt}}n_{a,b}=0,\ b\in\{i,j,h,l\}\end{cases} \tag{50}$$

可见，由于求解协调规划模型时不含海缆交叉规避约束式(30)，只是在优化结果中对于发生交叉的海缆直接采用折线处理来消除交叉。因此，所求解的协调规划模型的规模大大减小，从而有效提高计算效率。

4　算例分析

本章以额定容量分别为 200 MW 和 1 000 MW 的 2 个实际 OWF 为例，验证所提出的协调规划模型和求解方法的正确性和有效性。算例测试采用的计算机硬件环境为 32 GB 内存，CPU 为 12th Gen Intel(R) Core(TM) i7-12700F CPU@2.10 GHz，操作



(a) 连线型折线　(b) 节点型折线

图 4　连线型和节点型折线示意图

Fig.4　Diagram of connected and nodal polyline

系统为 Win11 64bit，在 GAMS win64 24.5.6 软件编程。

4.1 某额定容量 200 MW 的实际海上风电场

4.1.1 算例描述

该 OWF 政府核准批复的规划总装机容量为 200 MW，假设有 36 个风机待选位置，2 个海上升压站待选位置，待选位置的分布如图 5 所示。设定 35 kV 电压等级集电网络的 3 种可选类型风机额定功率分别为 5.5、6.45 和 8 MW，66 kV 电压等级集电网络的 3 种可选类型风机额定功率分别为 8.5、12 和 14 MW，各型号风机的切入风速、额定风速和切出风速分别为 3、10、25 m/s；假定有 5 种类型 35 kV 交流海缆、5 种类型 66 kV 交流海缆和 5 种类型升压变压器，具体参数如附录 A 表 A1—表 A4 所示。

4.1.2 最优规划结果

分别采用 Benders 分解算法、集中式求解、Benders 分解+折线算法和集中式+折线算法 4 种方法对该 OWF 进行风电机组和集电网络协调规划优化计算，得到的结果如表 1 所示。2 种集中式求解都采用 GAMS 软件的非线性求解器。可以看出，4 种方法优化结果的集电网络电压等级均为 35 kV，并都采用 1 个海上升压平台和 1 台 210 MW 升压变压器以及配置 4 种不同类型的风电机组。所提出的 Benders 分解+折线算法得到的最优拓扑连接如图 6 所示，该拓扑连接选取节点 37 作为海上升压平台，各风机的电能通过 7 条馈线汇集到海上升压站。此外，对节点 6 风机与海上升压站连接的海缆采用在节点 13 风机位置作为转折点的折线处理来规避海缆相交。在年等值收益上，Benders 分解算法和集中式求解的结果相近，2 种方法分别加上折线处理交叉优化算法后，都能得到更高的年等值收益，这是因为加入折线算法可以改善风机间的布局，减少尾流损耗，从而增加年等值发电收益。在计算效率方面，Benders 分解法比集中式求解的求解时间少 308 s，2 种方法分别加入折线处理海缆交叉算法后，由于减少了大量的海缆交叉规避约束式(30)，模型的求解时间分别缩短了 391 s 和 101 s，从而验证了所提出的折线处理海缆交叉方法能够有效提高模型求解的计算效率。

此外，采用分别对 OWF 风电机组和集电网络进行优化求解的分步规划方法，其年等值收益为 15 083 万元，明显小于所提出协调规划模型得到的年等值收益 15 724.9 万元，验证所提出 OWF 风电机组和集电网络协调规划模型的有效性。

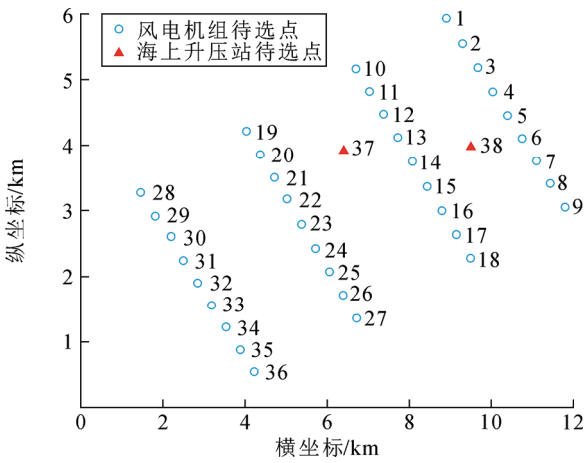


图 5 200 MW 算例 OWF 中待选点的相对位置

Fig.5 Relative positions of anticipated points in OWF of 200 MW case

表 1 200 MW 算例不同场景的优化规划结果对比

Table 1 Comparison of optimal planning results of different scenarios of 200 MW case

对比指标		不同算法下的取值			
		Benders 分解法	集中式求解	Benders 分解+折线算法	集中式+折线算法
年等值收益/万元		15 574.4	15 507.3	15 724.9	15 643.5
风机投资成本/万元		125 302.5	125 794.0	125 944.2	125 944.2
海缆投资成本/万元		6 307.0	6 482.3	6 410.2	6 095.2
升压站投资成本/万元		15 636.9	15 636.9	15 636.9	15 310.2
年等值网损成本/万元		56.1	58.0	51.9	52.4
年等值可靠性成本/万元		2 577.3	2 592.4	2 569.5	2 587.9
年等值发电收益/万元		28 662.3	28 717.6	28 857.3	28 798.0
电压等级/kV		35	35	35	35
风机数量/台	类型 1	9	4	2	2
	类型 2	10	8	11	11
	类型 3	11	16	15	15
海缆总长度/km	类型 1	16.2	9.9	10.7	8.4
	类型 2	4.4	5.7	0.4	6.3
	类型 3	10.5	11.0	12.4	6.0
	类型 4	1.3	4.6	7.2	7.4
	类型 5	3.7	3.9	3.0	4.5
海上升压平台个数		1	1	1	1
变压器容量/MVA		210	210	210	210
求解时间/s		1 007	1 315	616	1 214

4.2 某额定容量 1 000 MW 的实际海上风电场

4.2.1 算例描述

该 OWF 政府核准批复的规划总装机容量为 1 000 MW，假设有 104 个风电机组待选位置和 2 个海上升压站待选位置，OWF 中集电系统各待选点的位置分布如图 7 所示，集电系统的优化规划计算参数设置与 4.1 节的算例相同。

4.2.2　最优规划结果

由于该 OWF 规模较大，海缆交叉规避约束式(30)的约束总数达到 27 872 784 个，直接求解含约束式(30)的协调规划模型出现了内存溢出，在所采用的计算机上无法求解。通过对该 OWF 分别采用集中式+折线算法和 Benders 分解+折线算法进行优化计算，得到的结果如表 2 所示。可以看到，所提出的 Benders 分解+折线算法由于求解的主问题和子问题都是凸优化问题，比直接求解原非凸的 MINLP 模型获得了更优的解。从表 2 中可以看到，海缆投资成本更低，这是由于配置了更多大容量的风电机组，需要安装的风机总数量更少，故需要的海缆汇集线路也更少且截面积更大，海缆汇集线路的运行网损也更小，因而该方法获得结果的年等值发电收益更高；从年等值收益来看，所提出的 Benders 分解+折线算法结果比集中式+折线算法高 2.6%，即 1 651 万元，经济效益更高。

此外，所提出算法求解得出的最优拓扑连接如图 8 所示，可以看到，该 OWF 集电网络采用 66 kV 电压等级，配置了 3 种不同类型的大容量风电机组，并规划了 2 个容量都为 630 MW 的海上升压站，且分别在节点 69 和节点 89 的风机位置处采用折线处

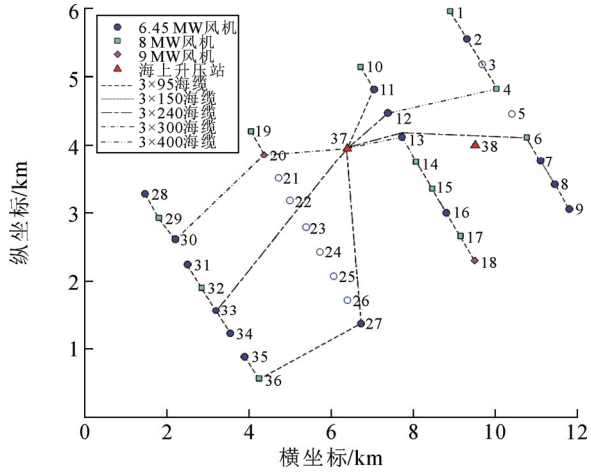


图 6　所提出算法求解得出的 200 MW 算例最优拓扑

Fig.6　Optimal topology of 200 MW case obtained by the proposed algorithm

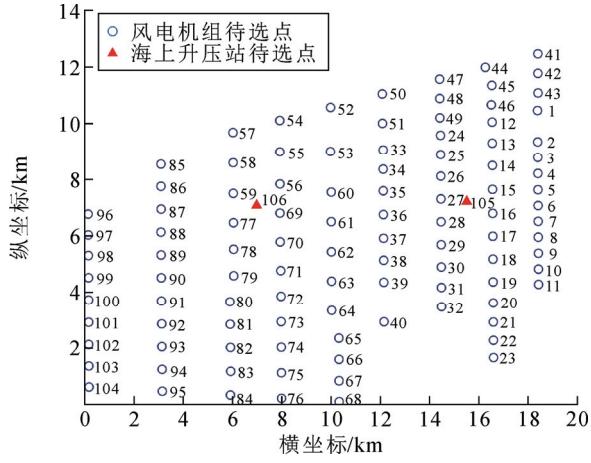


图 7　1 000 MW 算例 OWF 中待选点的相对位置

Fig.7　Relative positions of anticipated points in 1 000 MW case OWF

表 2　1 000 MW 算例不同场景的优化规划结果对比

Table 2　Comparison of optimal planning results of different scenarios of 1 000 MW case

对比指标		不同算法下的取值	
		集中式+折线算法	Benders 分解+折线算法
年等值收益/万元		63 729.3	65 380.8
风机投资成本/万元		650 882.5	652 402.5
海缆投资成本/万元		37 707.2	34 796.7
升压站投资成本/万元		36 584.0	36 534.0
年等值网损成本/万元		181.6	175.9
年等值可靠性成本/万元		14 038.7	13 801.2
年等值发电收益/万元		129 454.6	130 742.7
电压等级/kV		66	66
风机数量/台	类型 1	60	63
	类型 2	24	29
	类型 3	14	9
海缆总长度/km	类型 1	87.5	89.6
	类型 2	25.5	35.0
	类型 3	10.8	10.0
	类型 4	8.1	3.3
	类型 5	12.4	3.2
海上升压平台个数		2	2
变压器容量/MVA		{3×240，2×180}	{3×210，3×210}
求解时间/s		3 239	2 251

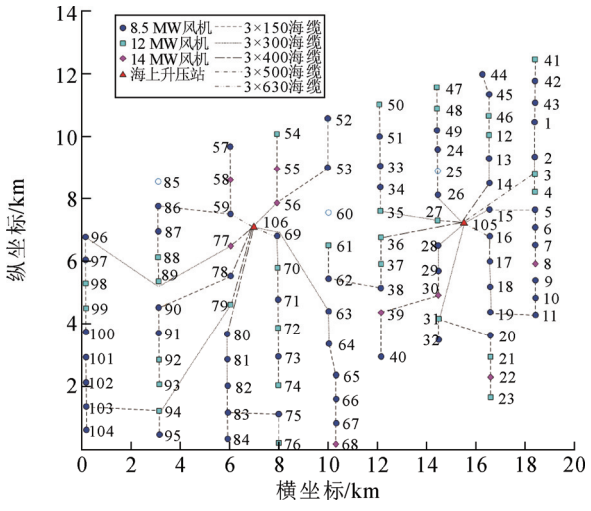


图 8　所提出算法求解得出的 1 000 MW 算例最优拓扑

Fig.8　Optimal topology of 1 000 MW case obtained by the proposed algorithm

理来规避海缆相交。对于此额定容量较大的 OWF，由于其集电网络电压等级的提升，海底电缆的传输能力也得到提高，从而可以减少总的电缆长度和输电损耗，同时大容量风机使得所需安装的风机总数减少，且风机分布更为均匀，减小了风机之间的尾流损耗，因此提高了 OWF 的年等值收益。

此外，对该算例采用分别对 OWF 风电机组和集电网络进行优化求解的分步规划方法，得到年等值收益为 63 249.4 万元，同样要明显小于所提协调规划模型得到的年等值收益 65 380.8 万元，从而验证了所提出风电机组和集电网络协调规划模型能够获得经济效益更优的 OWF 集电系统规划方案。

4.3 灵敏度分析

本节考虑风机和海缆的价格变化对优化规划模型目标函数中各项的影响，分别对风机和海缆的价格进行灵敏度分析。在 4.1 节算例 OWF 的基础上，分别对风机和海缆的价格改变±10%，采用所提出的 Benders 分解+折线算法对模型进行优化求解，所得结果如表 3 所示。可以看到，当风机的价格分别增大和减小 10%时，风机投资成本分别有 10%左右的变化，海缆投资成本均减小 2%左右；而当海缆的价格分别增大和减小 10%时，海缆投资成本分别有 6%左右的变化，风机投资成本变化很小，这主要是由于 OWF 实际总装机容量和政府核准批复的规划总装机容量之间的允许偏差很小；当风机或海缆的价格提高时，由于优化规划结果中选用了更多截面积较小的海缆以减少海缆投资成本，导致年等值网损成本有一定的增加；此外，风机和海缆的价格变化对年等值可靠性成本和年等值发电收益的影响都不大。

5 结论

1）所建立的 OWF 机组和集电网络协调优化规划模型，不仅对风电机组的位置分布、容量型号进行选择，还能实现对海缆的类型、海上升压平台的位置、平台上升压变压器的数量和容量、以及整个集电系统的电压等级和拓扑网络的综合优化，从而获得经济效益更优的 OWF 集电系统规划方案。

2）对于额定容量较小的 OWF，采用 35 kV 电压等级和建立 1 个海上升压平台的规划方案具有更优的经济性；对于大容量 OWF，采用 66 kV 电压等级的集电系统，安装大容量风电机组可减少集电系统的回路数，降低尾流损耗和海缆传输损耗，获得更优的经济效益。

3）所提出的结合 Benders 分解的折线处理海缆交叉方法与常规的直接加入海缆交叉规避约束方法相比，不仅有效提高了优化模型求解的计算效率，还能获得目标函数更优的OWF集电系统规划方案。随着双边环形等新型拓扑结构的 OWF 集电系统的研究和推广建设，后续将进一步探究不同拓扑结构下的 OWF 集电系统优化规划问题。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 肖晃庆，甘慧辰，黄 莹，等. 远海风电轻型化直流送出技术综述[J/OL]. 高电压技术，2025：1-18[2025-02-10]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20241030.
XIAO Huangqing, GAN Huichen, HUANG Ying, et al. Review of lightweight DC transmission technology for offshore wind power[J/OL]. High Voltage Engineering, 2025: 1-18[2025-02-10]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20241030.

[2] 陆振纲，谢立军，赵国亮，等. 海上风电柔性低频送出系统无功电压协调控制策略[J]. 高电压技术，2023，49(9)：3708-3718.
LU Zhengang, XIE Lijun, ZHAO Guoliang, et al. Coordinated reactive power-voltage control strategy of flexible low-frequency transmission system for offshore wind power integration[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3708-3718.

[3] 郝瑀然. 我国海上风电累计装机连续两年位居全球首位[EB/OL]. 中国政府网：人民日报，2023[2024-04-10]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202308/content_6897588. htm.
HAO Yuran. China’s cumulative installed capacity of offshore wind power has ranked first in the world for two consecutive years[EB/OL]. Chinese government website: People’s Daily, 2023[2024-04-10]. https://www. gov. cn/yaowen/liebiao/202308/content_6897588. htm.

[4] 江岳文，张金辉. 考虑风电接纳水平及负荷增长的海上风电场多阶段规划[J]. 电力自动化设备，2022，42(2)：85-91，111.
JIANG Yuewen, ZHANG Jinhui. Multi-stage planning of offshore wind farm considering wind power accommodation level and load increase[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 85-91, 111.

表 3 风机和海缆价格对优化结果的目标函数中各项的影响

Table 3 Impact of turbine and cable prices on several terms in the objective function

设备	价格变化/%	风机投资成本/万元	海缆投资成本/万元	年等值网损成本/万元	年等值可靠性成本/万元	年等值发电收益/万元
风机	+10	138 538.7(+10.00%)	6 231.6(−2.79%)	59.7(+15.03%)	2 571.3(+0.07%)	28 847.2(−0.04%)
风机	−10	113 643.4(−9.77%)	6 326.0(−1.13%)	53.0(+2.12%)	2 571.0(+0.06%)	28 904.9(+0.16%)
海缆	+10	126 270.5(+0.26%)	6 772.8(+5.66%)	58.1(+11.95%)	2 556.4(−0.51%)	28 751.0(−0.37%)
海缆	−10	126 581.8(+0.51%)	6 012.4(−6.21%)	49.3(−5.01%)	2 579.3(+0.38%)	28 934.1(+0.27%)

注：+表示增加，−表示减少，括号内数值表示结果的变化。

[5] BASTANKHAH M, PORTÉ-AGEL F. A new analytical model for wind-turbine wakes[J]. Renewable Energy, 2014, 70: 116-123.

[6] FRANDSEN S T. Turbulence and turbulence-generated structural loading in wind turbine clusters[M]. Roskilde, Denmark: Forskning-scenter Risoe, 2007.

[7] KATIC I, HØJSTRUP J, JENSEN N O. A simple model for cluster efficiency[M]//PALZ W, SESTO E. European Wind Energy Association Conference and Exhibition. Rome, Italy: A. Raguzzi, 1986: 407-410.

[8] CHEN K, SONG M X, ZHANG X, et al. Wind turbine layout optimization with multiple hub height wind turbines using greedy algorithm[J]. Renewable Energy, 2016, 96: 676-686.

[9] FENG J, SHEN W Z. Design optimization of offshore wind farms with multiple types of wind turbines[J]. Applied Energy, 2017, 205: 1283-1297.

[10] 罗正亮，刘怀西，张　敏，等. 考虑混搭风电机组的海上风电场集电线路拓扑动态优化方法[J]. 分布式能源，2023，8(4)：63-72.
LUO Zhengliang, LIU Huaixi, ZHANG Min, et al. A dynamic optimization method for offshore wind farm collector line topology considering mixed wind turbines[J]. Distributed Energy, 2023, 8(4): 63-72.

[11] 黄玲玲，符　杨，郭晓明. 大型海上风电场电气接线方案优化研究[J]. 电网技术，2008，32(8)：77-81.
HUANG Lingling, FU Yang, GUO Xiaoming. Research on optimization of electrical connection scheme for a large offshore wind farm[J]. Power System Technology, 2008, 32(8): 77-81.

[12] 梁宇涛，林舜江，冯祥勇，等. 海上风电场交流集电和多端柔直输电并网系统多目标优化规划[J]. 电网技术，2024，48(6)：2404-2415.
LIANG Yutao, LIN Shunjiang, FENG Xiangyong, et al. Multi-objective optimal planning for AC electrical collector and VSC-MTDC transmission grid-connected system of offshore wind farms[J]. Power System Technology, 2024, 48(6): 2404-2415.

[13] 李　岩，冯俊杰，卢毓欣，等. 大容量远海风电柔性直流送出关键技术与展望[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3384-3393.
LI Yan, FENG Junjie, LU Yuxin, et al. Key technologies and prospects of VSC-HVDC for large-capacity and long-distance offshore wind power transmission[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3384-3393.

[14] 吴　珹，米增强，杨玉新，等. 大型风机海上风电场集电系统拓扑优化[J]. 华北电力大学学报，2023，50(6)：31-39.
WU Jian, MI Zengqiang, YANG Yuxin, et al. Topology optimization of offshore wind farm power collection system with large wind turbine[J]. Journal of North China Electric Power University, 2023, 50(6): 31-39.

[15] 王邦彦，王秀丽，帅轩越，等. 基于潮流、可靠性线性化分析的海上风电场集电系统集中式拓扑优化[J]. 电力自动化设备，2023，43(8)：96-104.
WANG Bangyan, WANG Xiuli, SHUAI Xuanyue, et al. Centralized topology optimization of offshore wind farm collector system based on linearization analysis of power flow and reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(8): 96-104.

[16] 叶　婧，蔡俊文，张　磊，等. 考虑海缆实际载流量的海上风电集电系统拓扑优化[J]. 中国电力，2024，57(7)：173-181.
YE Jing, CAI Junwen, ZHANG Lei, et al. Topology optimization of offshore wind power collection system considering actual carrying capacity of submarine cables[J]. Electric Power, 2024, 57(7): 173-181.

[17] 张孝顺，李锦诚，郭正勋. 大模型辅助的大型海上风电场集电系统拓扑优化[J]. 高电压技术，2024，50(7)：2894-2905.
ZHANG Xiaoshun, LI Jincheng, GUO Zhengxun. Topology optimization of large-scale offshore wind farm collector systems based on large language models[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2894-2905.

[18] SHIN J S, KIM J O. Optimal design for offshore wind farm considering inner grid layout and offshore substation location[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(3): 2041-2048.

[19] 戚远航，侯　鹏，金荣森. 基于 Q 学习粒子群算法的海上风电场电气系统拓扑优化[J]. 电力系统自动化，2021，45(21)：66-75.
QI Yuanhang, HOU Peng, JIN Rongsen. Optimization of electrical system topology for offshore wind farm based on Q-learning particle swarm optimization algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 66-75.

[20] JENSEN N O. A note on wind generator interaction[R]. Roskilde, Denmark: Risø National Laboratory, 1983.

[21] TAO S Y, KUENZEL S, XU Q S, et al. Optimal micro-siting of wind turbines in an offshore wind farm using Frandsen-Gaussian wake model[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4944-4954.

[22] BAUER J, LYSGAARD J. The offshore wind farm array cable layout problem: a planar open vehicle routing problem[J]. Journal of the Operational Research Society, 2015, 66(3): 360-368.

[23] YANG J W, ZHANG N, KANG C Q, et al. A state-independent linear power flow model with accurate estimation of voltage magnitude[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3607-3617.

[24] 黄玲玲，符　杨，郭晓明. 海上风电场集电系统可靠性评估[J]. 电网技术，2010，34(7)：169-174.
HUANG Lingling, FU Yang, GUO Xiaoming. Reliability evaluation of wind power collection system for offshore wind farm[J]. Power System Technology, 2010, 34(7): 169-174.

[25] DAHMANI O, BOURGUET S, MACHMOUM M, et al. Optimization and reliability evaluation of an offshore wind farm architecture[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(2): 542-550.

[26] 张侃君，王　婷，周虎兵，等. 计及不确定性因素影响的变电站 220 kV 侧检修规划[J]. 高电压技术，2024，50(11)：4812-4825.
ZHANG Kanjun, WANG Ting, ZHOU Hubing, et al. Maintenance planning of 220 kV side in substation considering uncertain factors[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 4812-4825.



LAI Xin

赖　信
2001—，男，硕士生
主要从事电力系统优化与控制的研究工作
E-mail: 2770726188@qq.com



LIN Shunjiang
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

林舜江(通信作者)
1980—，男，博士，副研究员，博导
主要从事电力能源系统优化与控制的研究工作
E-mail: linshj@scut.edu.cn

收稿日期　2024-10-31　修回日期　2025-03-25　　编辑　程子丰

附录 A

表 A1　不同类型风电机组的参数

Table A1　Parameters of different types of wind turbines

电压等级/kV	类型 t	P_{tN}/MW	D_t/m
35	1	5.50	153.2
	2	6.45	173
	3	8.00	194.8
66	4	8.50	208
	5	12.00	236
	6	14.00	260

表 A2　不同类型 35 kV 交流海缆的参数

Table A2　Parameters of different types of 35 kV AC cables

类型 b	截面积/mm^2	$I_{N,b}$/A	R_b/(Ω·km^{-1})	X_b/(Ω·km^{-1})
1	3×70	242	0.34	0.45
2	3×120	323	0.20	0.27
3	3×240	494	0.10	0.14
4	3×300	546	0.08	0.11
5	3×400	603	0.06	0.08

表 A3　不同类型 66 kV 交流海缆的参数

Table A3　Parameters of different types of 66 kV AC cables

类型 b	截面积/mm^2	$I_{N,b}$/A	R_b/(Ω·km^{-1})	X_b/(Ω·km^{-1})
1	3×150	379	0.170	0.226
2	3×300	533	0.085	0.117
3	3×400	591	0.070	0.098
4	3×500	649	0.050	0.082
5	3×630	705	0.038	0.063

表 A4　不同类型变压器的参数

Table A4　Parameters of different types of transformers

变压器类型 s	$S_{s,N}$/MVA
1	120
2	180
3	210
4	240
5	250