

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.211521

# 基于改进麻雀搜索算法的大型海上风电场电缆布置优化

宋冬然<sup>1</sup>, 晏嘉琪<sup>1</sup>, 夏鄂<sup>1</sup>, 杨建<sup>1</sup>, 董密<sup>1</sup>, 陈思范<sup>2</sup>, 胡阳<sup>3</sup>, 房方<sup>3</sup>

(1. 中南大学自动化学院, 湖南 长沙 410083; 2. 明阳智慧能源集团股份有限公司, 广东 中山 528437;  
3. 华北电力大学控制与计算机工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 考虑多个设计变量和成本因素后, 大型海上风电场电缆布置优化问题呈现出高复杂度特点。为此, 提出一种基于改进麻雀搜索算法的电缆布置优化方法。首先, 以电缆全寿命周期总成本为目标函数, 考虑实际工程需求提出约束条件, 建立电缆布置优化模型。然后, 结合鸡群优化算法和 Prim 算法来改进麻雀搜索算法, 对海上风电场的电缆连接拓扑、电缆型号和变电站位置同时进行优化。最后, 进行实例分析, 验证模型的可行性和改进算法的有效性。结果显示, 全寿命周期模型可以全面评估电缆布置的经济性。相比于原算法, 改进麻雀搜索算法的寻优能力有较大提升, 且相对于文献中的改进算法具有结构简单、效率高和优化稳定性强的特点, 适用于大型海上风电场电缆布置优化问题。

**关键词:** 大型海上风电场; 电缆布置; 全寿命周期总成本; 改进麻雀搜索算法; 同时优化

## Optimization of cable layout for large-scale offshore wind farms based on an improved sparrow search algorithm

SONG Dongran<sup>1</sup>, YAN Jiaqi<sup>1</sup>, XIA E<sup>1</sup>, YANG Jian<sup>1</sup>, DONG Mi<sup>1</sup>, CHEN Sifan<sup>2</sup>, HU Yang<sup>3</sup>, FANG Fang<sup>3</sup>

(1. School of Automation, Central South University, Changsha 410083, China; 2. Mingyang Smart Energy Co., Ltd., Zhongshan 528437, China; 3. School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** Given the multiple design variables and cost factors, the cable layout optimization problem for large offshore wind farms is an issue of high complexity. This paper proposes a method for optimizing cable layout based on an improved sparrow search algorithm (ISSA). First, the life cycle cost of the cable is taken as the objective function, constraints are presented considering actual engineering requirements, and the optimization model of the cable layout is established. Then, combining the chicken swarm optimization algorithm and the Prim algorithm, the ISSA is proposed to simultaneously optimize the cable connection topology, cable type and substation location of the offshore wind farm. Finally, case studies are carried out to verify the feasibility of the model and the effectiveness of the improved algorithm. The results show that the life cycle model provides a comprehensive assessment of the economics of the cable layout. Compared with the original algorithm, the ISSA has greater ability to find the optimal solution. In addition, compared with the improved algorithms in the literature, the ISSA has a simple structure, high efficiency and strong optimization stability. It is suitable for the optimization of cable layout for offshore wind farms.

This work is supported by the Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2021JJ30875).

**Key words:** large-scale offshore wind farm; cable layout; life cycle cost; improved sparrow search algorithm; simultaneously optimize

## 0 引言

风能作为绿色清洁能源, 对环境友好且资源丰富, 在可再生能源中成本相对较低, 目前受到了广

泛的关注<sup>[1-4]</sup>。与陆上风电相比, 海上风电具有风能丰富、湍流较小、对环境影响小等优势<sup>[5-6]</sup>。然而, 海洋环境恶劣, 对设备要求高, 且安装维护难度较大。因此, 海上风电具有较高的度电成本。

电缆总成本可达到海上风电场成本的9%左右, 随着风机和安装成本的降低, 这一比例将会继续提升<sup>[7]</sup>。为降低成本, 风电场电缆布置优化引起了研究者的较多关注。早期相关研究多围绕最小化电缆

**基金项目:** 湖南省自然科学基金项目资助(2021JJ30875); 华能集团总部科技项目资助“海上风电与智慧能源系统联合实验室开放课题”(HNKJ20-H88-06)

长度展开, 仅优化电缆连接拓扑, 如文献[8]和文献[9]。此时, 采用图论方法<sup>[8]</sup>或经典启发式算法<sup>[9]</sup>可以较好地解决问题。

由于电缆成本同时受电缆拓扑及型号影响, 文献[10]将设备成本和施工成本视为优化目标, 在优化电缆连接拓扑后根据电缆中的电流确定型号。进一步, 文献[11]考虑线路损耗成本, 采用改进蝙蝠算法(Improved Bat Algorithm, IBA), 在优化电缆拓扑的同时优化电缆型号, 而文献[12-14]同样优化电缆连接拓扑和型号。由于在风电场机组选址确定后电缆拓扑仍依赖于变电站位置, 文献[15]采用顺序优化方式, 依次优化变电站和集电系统的拓扑结构。考虑多设计变量和成本因素后, 优化效果得到提升, 同时问题的复杂度增加。相关研究中相应地采用改进的图论方法<sup>[12, 15]</sup>、经典优化方法<sup>[13-14]</sup>和智能优化算法<sup>[10-11]</sup>求解, 以提升求解性能。

由于顺序优化方式存在优化范围较小的问题, 为获得更低的成本优化方案, 文献[16]提出将变电站位置、电缆拓扑与型号同时进行优化。然而, 考虑三种设计变量的风电场电缆布置全面优化问题呈现出高维度与非线性特性, 经典优化方法和图论方法难以解决。智能优化算法具有适应性、自学习能力强的特点, 针对大规模的复杂问题仍能给出较优解。然而, 目前应用于同时求解三变量的自适应粒子群优化算法(Adaptive Particle Swarm Optimization, APSO)<sup>[16]</sup>存在求解时间较长且容易陷入局部最优的问题, 需要采用更有效的优化算法。

针对上述问题, 提出改进的麻雀搜索算法(Sparrow Search Algorithm, SSA)来实现海上风电场电缆布置的全面优化。2020年文献[17]模拟麻雀觅食和躲避捕食者的行为提出SSA。通过标准测试函数试验, 对比于其他群智能优化算法, SSA展示了良好的搜索速度与精度<sup>[18]</sup>。针对电缆布置优化问题, SSA在迭代后期收敛速度较慢, 而文献[19]提出的鸡群优化算法(Chicken Swarm Optimization, CSO)具有与SSA类似的多子群结构, 搜索范围较广, 在迭代后期仍能较好的收敛速度。通过二者结合, 可提升算法的优化效果。

相较于现有研究, 本文的主要贡献可概括如下:

1) 提出一种考虑风况的电缆全寿命周期成本模型, 以更全面准确地评估不同电缆布置的经济性。同时, 考虑实际工程需求确定约束条件。

2) 结合CSO算法并引入线性衰减的惯性权重, 提出一种改进麻雀搜索算法(Improved Sparrow Search Algorithm, ISSA)求解电缆布置优化问题。

3) 为提高优化求解效率, 改进算法的初始化步

骤。在随机确定变电站位置后对风机进行分组, 结合Prim算法初始化电缆布置, 并根据约束条件确定电缆型号。

## 1 大型海上风电场电缆布置优化问题框架

### 1.1 优化目标

为全面评估不同电缆布置方案的经济性, 本文建立电缆全寿命周期成本模型如式(1)所示。

$$C_{LC} = C_{EI} + C_C + C_{LL} + C_{FL} + C_M + C_D \quad (1)$$

式中,  $C_{LC}$ 、 $C_{EI}$ 、 $C_C$ 、 $C_{LL}$ 、 $C_{FL}$ 、 $C_M$ 和 $C_D$ 分别表示电缆全寿命周期成本、设备投资成本、施工成本、线路损耗成本、故障损失成本、维护检修成本和退役处置成本。

设备投资成本 $C_{EI}$ 表示为

$$C_{EI} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n 3A_{ij}L_{ij}C_{T_{ij}} + C_{sw} \sum_{j=1}^n A_j \quad (2)$$

$$L_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \quad (3)$$

式中:  $i$ 和 $j$ 为风机和变电站的站点序号, 取值为1时表示变电站;  $n$ 为站点总数;  $A_{ij}$ 为二元变量, 表示电缆连接情况, 当站点 $i$ 和 $j$ 之间存在连接电缆时取值为1, 否则为0;  $L_{ij}$ 为站点 $i$ 和 $j$ 之间的距离, 通过站点位置坐标计算;  $T_{ij}$ 为站点 $i$ 和 $j$ 之间连接的电缆型号;  $C_{T_{ij}}$ 为与该型号对应的电缆单价;  $C_{sw}$ 为单个开关设备的价格。

施工成本 $C_C$ 可以表示为

$$C_C = C_t \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij}L_{ij} \quad (4)$$

式中,  $C_t$ 为电缆单位长度的施工成本。

文献[20]采用年利用小时数计算 $C_{LL}$ , 为提高准确度, 本文根据实际风况的每小时离散化数据进行计算。将所有节点的电压固定为中压集电系统的额定电压, 线路损耗成本 $C_{LL}$ 表示为

$$C_{LL} = 3 \times 8760 \sum_{i=0}^{N_Y-1} \sum_{s=1}^{N_S} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{e}{(1+r)^t} A_{ij}L_{ij}p_s I_{ij,s}^2 R_{T_{ij}} \quad (5)$$

式中:  $N_Y$ 为风电场总寿命年数;  $e$ 为电价;  $r$ 为折现率;  $N_S$ 为不同风况场景的数量;  $p_s$ 为一年中风况场景 $s$ 出现的概率;  $R_{T_{ij}}$ 为与电缆型号 $T_{ij}$ 对应的单位长度电阻;  $I_{ij,s}$ 为第 $s$ 种风况下站点 $i$ 和 $j$ 之间流过的电流, 计算公式为

$$I_{ij,s} = \frac{\sum_{m \in W_j} P_m}{\sqrt{3} \cos \phi U_r} \quad (6)$$

式中:  $P_m$ 为风机 $m$ 的发电量, 考虑实际风况, 基

于 Jensen 尾流模型, 综合多风机相互间的尾流效应计算得到;  $W_j$  为站点  $j$  后连接的风机集合;  $U_r$  为中压集电系统的额定电压;  $\cos\varphi$  为功率因数。

故障损失成本  $C_{FL}$  计算公式为<sup>[21]</sup>

$$C_{FL} = \sum_{t=0}^{N_Y-1} \frac{e}{(1+r)^t} P_{lost} \lambda_c T_{MTTR,c} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n 3A_{ij} L_{ij} + \sum_{t=0}^{N_Y-1} \frac{e}{(1+r)^t} P_{lost} \lambda_{sw} T_{MTTR,sw} \sum_{j=1}^n A_{1j} \quad (7)$$

式中:  $\lambda_c$  和  $\lambda_{sw}$  分别为海上风电场一年中电缆和开关设备的故障次数;  $T_{MTTR,c}$  和  $T_{MTTR,sw}$  分别为电缆和开关设备故障的平均恢复时间;  $P_{lost}$  为故障损失的平均功率, 计算公式为

$$P_{lost} = \frac{\sum_{m=2}^n P_m}{\sum_{j=1}^n A_{1j}} \quad (8)$$

维护检修成本  $C_M$  计算公式为

$$C_M = \sum_{t=0}^{N_Y-1} \frac{1}{(1+r)^t} C_{EI} (\eta_m + \eta_{r,t}) \quad (9)$$

式中:  $\eta_m$  为运行维护费率, 一般取 0.5%;  $\eta_{r,t}$  为检修费率, 随运行年限增加而增加<sup>[22]</sup>。

退役处置成本  $C_D$  包括退役处理费和设备残值费, 残值主要考虑电缆中铜的回收价值<sup>[23]</sup>。退役处置成本公式为<sup>[24]</sup>

$$C_D = \frac{1}{(1+r)^{N_Y-1}} (0.62C_c - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n 3A_{ij} L_{ij} \pi r_{T_{ij}}^2 C_{cu} \rho_{cu}) \quad (10)$$

式中:  $r_{T_{ij}}$  为与电缆型号  $T_{ij}$  对应的铜导体半径;  $C_{cu}$  和  $\rho_{cu}$  分别表示回收铜的单价和密度。

### 1.2 设计变量

由式(2)一式(10)可知, 电缆连接拓扑  $A_{ij}$  和变电站位置  $(x_1, y_1)$  影响电缆长度  $A_{ij} L_{ij}$ , 进而影响电缆的各个成本项。此外, 当电缆型号  $T_{ij}$  改变时: 由式(2)和式(9)可知, 电缆单价  $C_{T_{ij}}$  随之改变, 进而影响总成本中的设备投资成本和维护检修成本; 由式(5)和式(10)可知, 与电缆型号对应的单位长度电阻  $R_{T_{ij}}$  和铜导体半径  $r_{T_{ij}}$  将发生改变, 线路损耗成本和退役处置成本受到影响。因此, 电缆连接拓扑  $A_{ij}$ 、变电站位置  $(x_1, y_1)$  和电缆型号  $T_{ij}$  共同影响电缆全寿命周期成本。

文献[13]将变电站位置固定在风电场中心, 仅优化电缆连接拓扑和电缆型号, 此时, 电缆长度仅由电缆连接拓扑决定, 调整范围减少。文献[8]忽略

了线路损耗成本, 选择满足约束条件的最小截面积电缆, 此时可能由于线路损耗成本过高, 导致整体成本增加。综合考虑影响电缆全寿命周期成本的各个因素, 本文选择电缆连接拓扑  $A_{ij}$ 、变电站位置  $(x_1, y_1)$  和电缆型号  $T_{ij}$  三者作为设计变量。

### 1.3 约束条件

考虑实际工程需求, 电缆布置优化模型需满足以下约束条件:

- 1) 为满足施工维护需要, 在优化电缆拓扑时应避免电缆交叉或重叠。同时, 海底电缆平行敷设时的间距不宜小于最高水位水深的 2 倍。
- 2) 海上变电站的馈线数不宜过多, 一般不超过 8 条。
- 3) 实际通过电缆的电流应小于选定型号的额定电流。为保证安全性, 应考虑一定的冗余系数。
- 4) 各段电缆线路上的实际压降应小于最大压降限制。
- 5) 电缆截面积应满足短路热稳定性要求。

其中, 电缆拓扑约束和馈线数约束(即约束 1 和 2)与电缆连接拓扑和变电站位置有关。其余约束条件与电缆型号的选取有关, 包括载流量约束、压降约束和短路热稳定性约束。

### 1.4 整体模型

综合电缆成本模型、设计变量和约束条件, 大型海上风电场电缆布置优化问题的数学模型如式(11)所示。

$$\begin{aligned} \min C_{LC} = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} L_{ij} \left( 3C_{T_{ij}} + C_t + \frac{0.62C_t}{(1+r)^{N_Y-1}} - \frac{3\pi r_{T_{ij}}^2 C_{cu} \rho_{cu}}{(1+r)^{N_Y-1}} \right) + \\ & C_{sw} \sum_{j=1}^n A_{1j} + 3 \times 8760 \sum_{t=0}^{N_Y-1} \sum_{s=1}^{N_s} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{e}{(1+r)^t} A_{ij} L_{ij} p_s I_{ij,s}^2 R_{T_{ij}} + \\ & \sum_{t=0}^{N_Y-1} \frac{e}{(1+r)^t} P_{lost} \left( \lambda_c T_{MTTR,c} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n 3A_{ij} L_{ij} + \lambda_{sw} T_{MTTR,sw} \sum_{j=1}^n A_{1j} \right) + \\ & \sum_{t=0}^{N_Y-1} \frac{1}{(1+r)^t} \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n 3A_{ij} L_{ij} C_{T_{ij}} + C_{sw} \sum_{j=1}^n A_{1j} \right) (\eta_m + \eta_{r,t}) \\ \text{s.t.} & \begin{cases} ij \cap i'j' = \emptyset & \forall A_{ij}, A_{i'j'} = 1, i \neq j \neq i' \neq j' \\ d_{ij, i'j'} \geq 2h & \forall ij \parallel i'j', i \neq j \neq i' \neq j' \\ \sum_{j=1}^n A_{1j} \leq 8 \\ kI_{ij} \leq I_{rated}(T_{ij}) & \forall A_{ij} = 1 \\ \Delta U_{ij} \leq U_{max} & \forall A_{ij} = 1 \\ S(T_{ij}) \geq \frac{I_{\infty} \sqrt{t}}{C} & \forall A_{ij} = 1 \end{cases} \quad (11) \end{aligned}$$

## 2 基于 ISSA 的大型海上风电场电缆布置优化求解

### 2.1 麻雀搜索算法 (SSA)

在 SSA 中, 默认麻雀群体中存在发现者和加入者, 根据适应度值对麻雀个体进行排序, 具有较好适应度值的个体为发现者。同时, 麻雀有一定概率注意到捕食者并躲避其攻击, 即群体中存在警惕者。

在 SSA 中, 发现者根据式(12)更新位置。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \cdot \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot iter_{\max}}\right) & R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + Q \cdot L & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $X_{i,j}$  为第  $i$  个麻雀在第  $j$  维的位置;  $t$  表示当前迭代次数;  $\alpha$  是一个(0,1)内的随机数;  $iter_{\max}$  为最大迭代次数;  $Q$  是一个服从正态分布的随机数;  $L$  为  $1 \times d$  的矩阵, 矩阵元素全为 1;  $R_2$  为 [0,1] 范围内的随机数;  $ST$  为预警值。

加入者会根据发现者提供的方向觅食, 如式(13)所示。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_{\text{worst}} - X_{i,j}^t}{i^2}\right) & i > n/2 \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \cdot A^+ \cdot L & i \leq n/2 \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $X_{\text{worst}}$  为全局最差位置;  $X_p$  为当前发现者中的最优位置。参数  $A^+$  计算公式为

$$A^+ = A^T (AA^T)^{-1} \quad (14)$$

式中,  $A$  为  $1 \times d$  的矩阵, 矩阵元素随机取为 -1 或 1。

SSA 随机选取警惕者, 其位置更新公式为

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{\text{best}}^t + \beta \cdot |X_{i,j}^t - X_{\text{best}}^t| & f_i > f_g \\ X_{i,j}^t + K \cdot \left(\frac{X_{i,j}^t - X_{\text{worst}}^t}{(f_i - f_w) + \varepsilon}\right) & f_i = f_g \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $f_i$  为第  $i$  个麻雀的适应度值;  $f_g$  和  $f_w$  分别为全局范围内最优和最差的适应度值;  $X_{\text{best}}$ 、 $X_{\text{worst}}$  分别为全局最优、最差位置;  $\beta$ 、 $K$  为步长控制参数。

### 2.2 改进麻雀搜索算法 (ISSA)

由于优化变量较多, SSA 解决大型海上风电场的电缆布置优化问题时容易陷入局部最优, 且需要较长的迭代过程。针对以上问题, 提出改进麻雀搜索算法, 对 SSA 的初始化过程、发现者和加入者的位置更新三部分分别进行改进。

#### 2.2.1 算法初始化

Prim 算法描述如下: 两个集合  $A$ 、 $B$  分别表示找到的点集和未找到的点集, 以  $A$  中的点为起点,

$B$  中的点为终点, 每次取其中最小权值的边, 同时将  $B$  集中选取的终点加入  $A$  集中, 重复此步骤, 直至  $B$  集合为空。

为了加速收敛, 本文结合 Prim 算法初始化种群, 具体初始化步骤如图 1 所示。首先随机选取变电站位置, 并根据变电站位置对风机进行分组, 然后应用 Prim 算法连接每组风机, 最后选择满足约束条件的最小电缆型号。

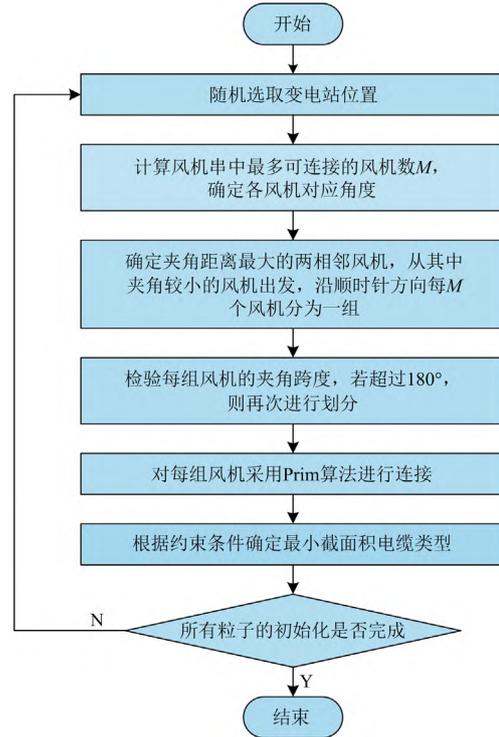


图 1 ISSA 的初始化步骤

Fig. 1 ISSA initialization steps

风机分组方式描述如下: 为满足电缆载流量约束条件, 一个风机串中连接的风机不能过多。在对风机进行分组前, 首先应根据最大截面积电缆的额定电流确定一个风机串中最多可连接的风机数  $M$ 。同时, 计算变电站与风机之间的连线与以变电站为起点的水平射线之间的夹角(如图 2(a), 风机 1 对应夹角为  $\alpha$ , 风机 2 对应夹角为  $\beta$ )。风机分组时, 首先确定夹角距离最大的两台相邻风机, 然后从两台风机中夹角较小的一台出发, 沿顺时针方向进行分组。其中, 每  $M$  台风机为一组, 最后一组风机数小于或等于  $M$ 。最后, 计算每组风机的夹角跨度, 为防止电缆交叉, 若夹角跨度超过  $180^\circ$ , 需要将该组风机再次划分。如图 2(b), 1 号和 2 号风机间的夹角距离最大。因此, 从 1 号风机开始, 每 6 个风机根据角度划分为一组, 其中最后一组风机夹角跨度

超过 180°, 根据角度平分。

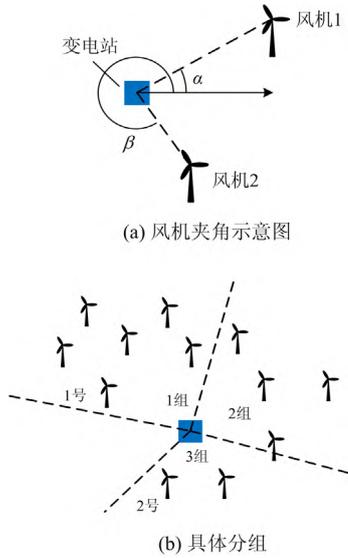


图 2 风机分组示意图

Fig. 2 Schematic diagram of turbine grouping

### 2.2.2 发现者的位置更新

在 SSA 中,  $R_2 < ST$  时, 发现者的各维度位置均在减小, 影响优化效果。鸡群优化算法中的公鸡类似于发现者, 可以向不同方向更新位置, 且适应度不同的个体搜索范围不同, 优化效果较好。因此, 本文结合 CSO 中的公鸡位置更新公式改进 SSA。同时, 引入线性衰减的惯性权重, 以在迭代前期进行较大范围的全局搜索, 迭代后期使算法趋于收敛, 加快收敛速度。

改进式(12), 得到式(16)。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} X_{i,j}^t \cdot (1 + \omega \cdot \text{randn}(0, \sigma^2)) & R_2 < ST \\ X_{i,j}^t + Q \cdot L & R_2 \geq ST \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\text{randn}(0, \sigma^2)$  为满足均值为 0、方差为  $\sigma^2$  的正态分布的随机数; 参数  $\omega$  和  $\sigma$  计算公式分别为

$$\omega = \omega_{\max} - (\omega_{\max} - \omega_{\min}) \times \frac{t}{\text{iter}_{\max}} \quad (17)$$

$$\sigma = \exp\left(-\frac{i}{\alpha \cdot \text{iter}_{\max}}\right) \quad (18)$$

式中:  $\omega_{\max}$  取为 1;  $\omega_{\min}$  取为 0。

### 2.2.3 加入者的位置更新

根据式(13)中  $i \leq n/2$  时的更新公式, 参数  $A^+$  的调节范围较小, 算法容易陷入局部最优。因此, 本文采用服从标准正态分布的随机数进行替换, 以使得加入者跟随最优位置的程度可以较大范围地随机调整。同时, 引入随迭代进行衰减的惯性权重改进式(13), 得到式(19)。

$$X_{i,j}^{t+1} = \begin{cases} Q \cdot \exp\left(\frac{X_{\text{worst}} - X_{i,j}^t}{i^2}\right) & i > n/2 \\ X_p^{t+1} + |X_{i,j}^t - X_p^{t+1}| \cdot \omega \cdot \text{randn}(0,1) & i \leq n/2 \end{cases} \quad (19)$$

式中:  $\text{randn}(0,1)$  为满足均值为 0、方差为 1 的正态分布的随机数;  $\omega$  为线性衰减的惯性权重。  $i \leq n/2$  时, 控制算法迭代初期在较广的范围内寻优, 随着迭代进行使算法趋于收敛。

### 2.3 算法实施流程

如图 3 所示, 采用 ISSA 算法优化大型海上风电场的电缆布置, 具体步骤如下所述。

步骤 1: 初始化参数, 先随机选择变电站位置, 对风机进行分组, 然后采用 Prim 算法确定电缆拓扑, 根据最小电缆截面积原则确定电缆型号;

步骤 2: 根据式(11)计算电缆总成本, 即算法的适应度值;

步骤 3: 将适应度值排序, 根据顺序将麻雀种群分为发现者和加入者;

步骤 4: 根据式(16)更新发现者位置;

步骤 5: 根据式(19)更新加入者位置;

步骤 6: 随机选择警戒者, 根据式(15)更新位置;

步骤 7: 更新适应度值, 若未达到终止条件, 返回步骤 3 继续循环, 反之, 循环终止, 输出最优电缆布置。

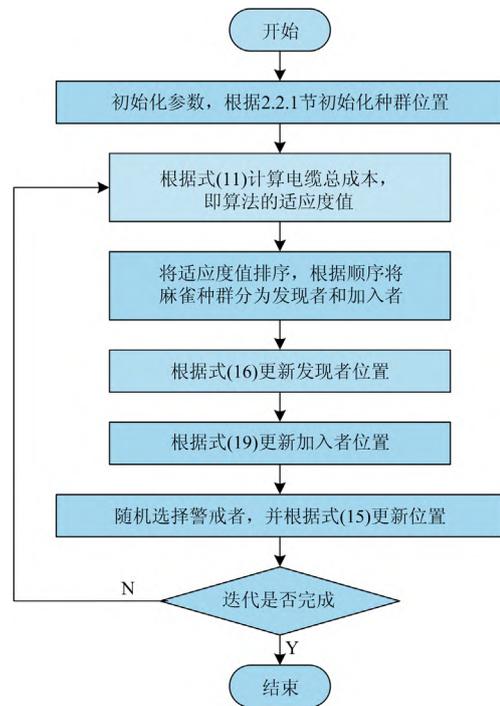


图 3 基于 ISSA 的电缆布置优化流程

Fig. 3 ISSA-based cable layout optimization flowchart

### 3 实例分析

#### 3.1 实例参数

本文选择由 27 台风机组成的不规则海上风电场作为研究案例。其中, 风机站点位置根据珠海桂山海上风电场的一期项目确定, 不作为优化变量。珠海桂山海上风电场的实际布置见图 4。

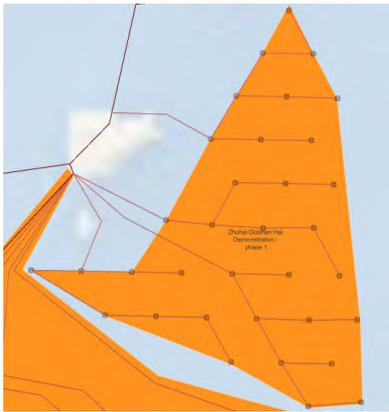


图 4 珠海桂山海上风电场风机布置

Fig. 4 Layout of Zhuhai Guishan offshore wind farm

珠海桂山海上风电场位于中国南海, 该海上风电场区域夏季多台风, 主导风向为东南向, 冬季风向多为东北向, 全年主导风向为东南向。且由于海上区域较为宽广, 建筑较少, 因此风速相较于陆地更高。珠海桂山海上风电场区域的实际风向与风速分布情况如图 5 所示。

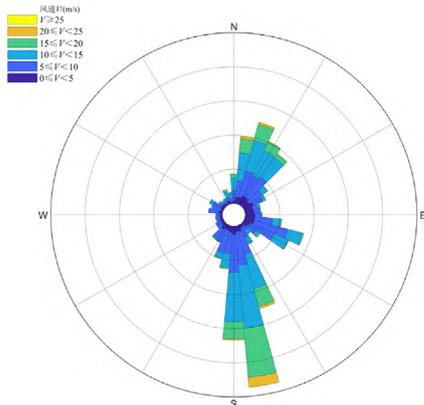


图 5 实际风况分布

Fig. 5 Actual wind distribution

本文实例分析选择的风机型号为 DTU-10 MW, 其具体参数信息见表 1。考虑到海上风电场的中压集电系统的额定电压通常为 35 kV, 验证短路热稳定性要求的最小电缆截面积后, 本文选择使用表 2 中的 6 种 35 kV 电缆。

本文在 Matlab 软件上进行实例仿真, 实验仿真环境为 Windows 10, Intel Core i5-10210U CPU @1.60 GHz 2.11GHz, RAM 16 GB。主要的仿真参数如下:  $C_{sw}$  取 10 万元/台,  $C_l$  取 30 万元/km,  $r$  取 8%,  $\pi$  取 0.79 元/kWh,  $\lambda_c$  取 0.1 次/(100 km<sup>2</sup>·年),  $T_{MTTR,c}$  取 1 440 h/次,  $\lambda_{sw}$  取 0.025 次/年,  $T_{MTTR,sw}$  取 240 h/次,  $N_Y$  取 20 年,  $C_{cu}$  取 3.08 万元/t,  $\rho_{cu}$  取 8.9 t/m<sup>3</sup>, 种群规模为 200, 最大迭代次数为 2 000。

表 1 DTU-10 MW 风机参数

Table 1 DTU-10 MW wind turbine parameters

风机型号	切入 风速/(m/s)	额定 风速/(m/s)	切出 风速/(m/s)	轮毂 高度/m	转子 直径/m
DTU-10 MW	4	11.4	25	119	178.3

表 2 6 种电缆型号的参数

Table 2 Parameters of six cable types

电缆截 面积/mm <sup>2</sup>	90℃ 导体最大的 交流电阻/(Ω/km)	载流 量/A	单价/ (元/m)	导体 直径/mm
70	0.342 0	215	1 101.09	10
95	0.246 5	255	1 221.21	11.6
150	0.158 7	335	1 491.48	14.6
240	0.097 1	430	1 771.79	18.4
400	0.061 4	550	2 302.33	23.8
500	0.057 3	630	2 811.33	26.6

#### 3.2 ISSA 初始化分析

群智能优化算法一般采用随机初始化的方式。结合电缆布置问题的特点, 本文提出的 ISSA 通过 Prim 算法初始化种群。为验证初始化方式的有效性, 本文分别运行随机初始化的 ISSA 算法(ISSA-RI) 和 ISSA 算法 20 次, 对结果进行比较分析。

图 6 所示的箱线图表示了两种算法在 20 次运行中得到的适应度值的分布情况: 在 20 次运行过程中, 相比于 ISSA-RI, ISSA 获得了更小的适应度均值, 且适应度值波动范围更小。

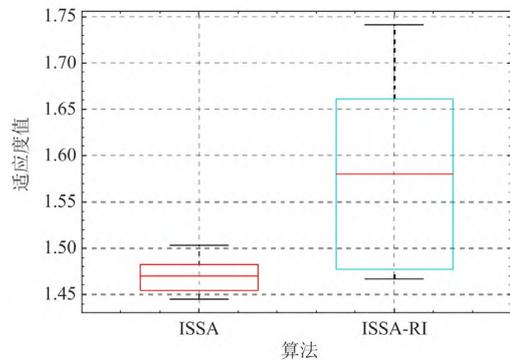


图 6 ISSA-RI 和 ISSA 的适应度值分布

Fig. 6 Fitness value distribution of ISSA-RI and ISSA

表 3 进一步展示了不同初始化方法下的数值统计结果。相比于 ISSA-RI, 虽然 ISSA 算法的运行时间长约 100 s, 但收敛速度明显较快, 收敛时间的平均值缩短约 25 s。结合图 6 的分析, 就最终的优化结果来说, ISSA 算法的表现较稳定, 且优化成本较低。对比两种算法优化成本的平均值, ISSA 算法相

比于 ISSA-RI 节约了 6.9% 的成本。从上述分析可得, 由于增加了风机分组和 Prim 算法初始化电缆拓扑的过程, ISSA 算法的运行时间增加, 但增加幅度不大, 且在一定程度上提高了收敛速度和优化精度。因此, 通过风机分组和 Prim 算法初始化种群是有效的。

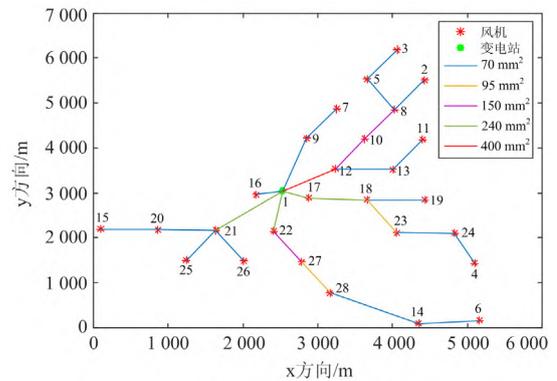
表 3 ISSA-RI 和 ISSA 算法的优化结果

Table 3 Optimization results of ISSA-RI and ISSA

算法	运行时间/s			收敛代数/次			收敛时间/s			优化成本/亿元		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
ISSA-RI	413	410	411	1 831	1 267	1 595	375.36	259.74	327.76	1.741 5	1.467 0	1.577 8
ISSA	512	506	509	1 713	712	1 193	438.53	180.85	303.98	1.503 6	1.445 1	1.469 2

### 3.3 优化布置结果分析

采用 ISSA 算法同时优化电缆拓扑、变电站位置和电缆型号得到的电缆优化布置(LA1)如图 7(a)所示。不考虑线路损耗成本, 选择满足约束的最小型号电缆时的布置(LA2)如图 7(b)所示。固定海上变电站位于风机布局中心, 采用 ISSA 算法同时优化电缆拓扑和电缆型号得到的电缆优化布置(LA3)如图 7(c)所示。



(c) 变电站位于中心的布置(LA3)

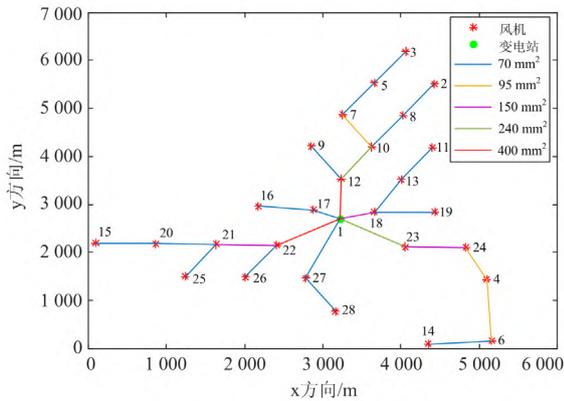
图 7 优化电缆布置

Fig. 7 Optimized cable layout

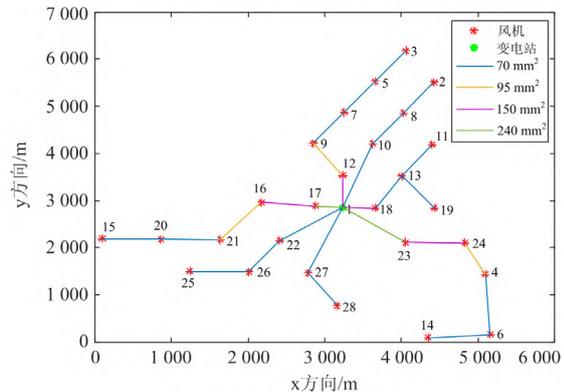
对比图 7(a)和图 7(b), LA2 选择的电缆均为满足约束的最小型号电缆, 而 LA1 在 4 号与 6 号风机、7 号与 10 号风机之间选择了 95 mm<sup>2</sup> 的电缆型号。同时, 相对于 LA1, LA2 趋向于选择连接风机间电流较小的通路, 以采用较小截面积电缆降低成本。对于变电站位置, LA1 和 LA2 非常接近, 相差仅 160 m。

对比图 7(a)和图 7(c), 相比于 LA1, LA3 中的海上变电站位置向左上方移动, 位置变化了约 779 m。同时, 电缆连接拓扑发生了较大变化, 以满足约束条件, 并降低总成本。

为进一步比较选择不同设计变量时的优化性能, 图 8 给出了 LA1、LA2 和 LA3 的各电缆成本项。LA1 的总成本最小, 仅为 1.445 1 亿元。其中, 设备投资成本占比最大, 约占总成本的 59.2%, 线路损耗、故障损失和维护检修三者成本分别占 17.2%、9.8%和 11.1%, 而其他两项成本的占比相对较小。



(a) 实际优化布置(LA1)



(b) 选择最小截面积电缆的布置(LA2)

对比 LA1 和 LA2, 两种布置的施工成本较为接近, 而其他成本差异均较大。即电缆总长度变化较小, 而电缆型号和拓扑结构发生了较大的改变。由于 LA2 趋向于选择型号较小的电缆, 设备投资成本和运行维护成本相对于 LA1 均减小了约 3.9%, 而线路损耗成本增加了 33.3%。同时, 为使得流过电缆的电流尽可能小, LA2 的变电站馈线数增加, 使得故障损耗成本减少了 9.4%。总体上, 由于线路损耗成本过大, LA2 的电缆总成本高于 LA1。相对于 LA2, LA1 的总成本减少了 2.1%。因此, 考虑线路损耗成本, 在优化电缆拓扑的同时优化电缆型号可以平衡各成本项, 获得更低的总成本。

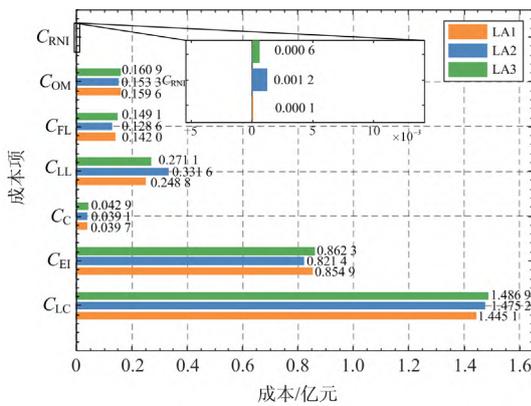


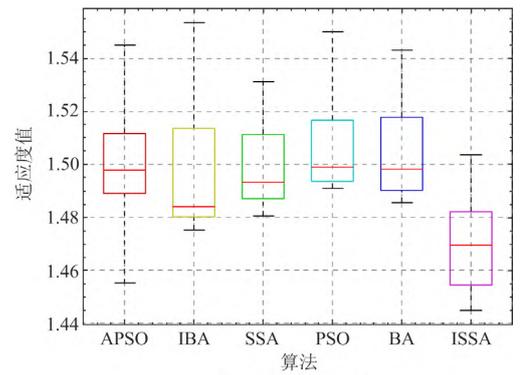
图 8 电缆成本分析结果

Fig. 8 Cable cost analysis results

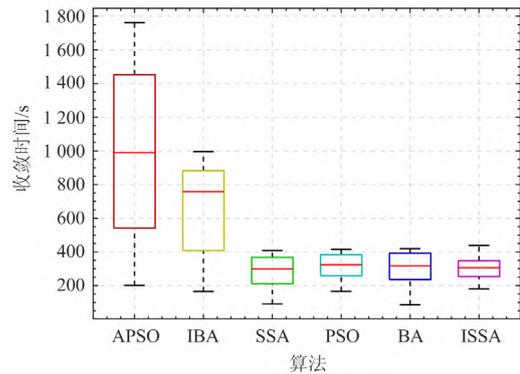
对比 LA1 和 LA3, 各成本项均有较大的改变。这是由于海上变电站位置变化时, 电缆长度相应地发生了变化。LA3 相对于 LA1, 电缆敷设总长度增加了 8.1%, 造成所有成本项均有一定幅度的增加。对比优化后的总成本, 考虑变电站位置的自由度时, LA1 相对于 LA3 减少了 2.8% 的成本。因此, 海上变电站的位置对电缆敷设长度的影响较大。同时, 当海上变电站位置改变时, 由于约束条件的限制需要改变相应的电缆拓扑和电缆型号。依据上述结果讨论, 优化电缆拓扑和电缆型号的同时优化海上变电站位置是有必要的。此外, 考虑电缆全生命周期成本可以更准确地衡量不同电缆布置的经济性。

### 3.4 不同算法的结果比较

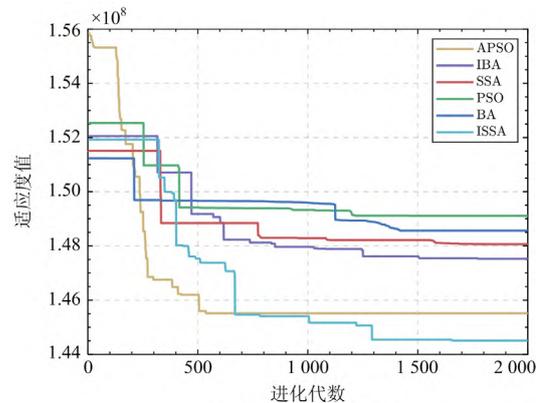
海上风电场电缆布置优化的相关研究中, 文献 [11] 和文献 [16] 分别采用 IBA 和 APSO 算法进行优化设计。为验证基于 SSA 改进算法的有效性, 对 ISSA 算法与 APSO、IBA、SSA、PSO、BA 算法的优化结果进行对比分析。其中, 按照与 ISSA 算法相同的步骤初始化其他 5 种算法, 分别运行 6 种算法 20 次, 统计结果如图 9 所示。



(a) 适应度值分布



(b) 收敛时间分布



(c) 最优解的迭代曲线

图 9 6 种算法的统计结果

Fig. 9 Statistical results of six algorithms

图 9 中, 对比 SSA 与 PSO、BA 3 种原始优化算法: 三者的收敛时间较为接近, 但 SSA 算法的适应度值显著低于 PSO 和 BA 算法。可见, SSA 在 3 种原始算法中具有最好优化求解性能。对比 ISSA 与 APSO、IBA 3 种改进算法, APSO 和 IBA 算法的收敛时间较长, 且分布较为分散。与之相反, ISSA 的收敛时间较短, 且收敛效果比较稳定。从图 9(c) 的迭代曲线可以看出: IBA 的优化成本明显较高, 且收敛速度较慢; APSO 算法在迭代前期的收敛速度较快, 但后期陷入局部最优; 对于最终的优化成

本, ISSA 低于 APSO 算法 0.7%。

6 种算法在 20 次运行中的性能统计结果如表 4 所示。就运行时间而言: SSA、PSO 和 BA 所需的时间较短, 但 ISSA 与三者非常接近, 平均值仅相差约 50 s; 而 APSO 算法所需的时间最长, 约为 ISSA 的 4 倍。比较收敛情况, APSO 算法的收敛代数平均值最小, 但出现了早熟现象, 且收敛时间最长; 而 ISSA 的收敛代数较小, 且收敛时间较短, 相对于 APSO 算法减少了 709.6 s。对于最终的优化结果, 原始优化算法明显差于改进算法。原始优化算法中, SSA 的优化成本较低, 平均值相对于 PSO 和 BA 分别减少了 0.6%和 0.5%; 在改进算法中, ISSA 的优

化成本明显低于其他算法, 平均值相对于 APSO 和 IBA 分别减少了 2.1%和 1.8%。

通过对比 SSA 与 PSO、BA 算法的优化结果, 验证了 SSA 在解决此类问题时收敛性和优化精度明显较优, 基于 SSA 优化电缆布置是合理的。然而, 相较于 IBA 和 APSO, SSA 得到的最优成本较高, 因此, 改进 SSA 是必要的。相对于 SSA, ISSA 在优化精度方面有显著的提升, 且能较好地避免早熟现象。在 3 种改进算法中, ISSA 效果优于相关文献中采用的 APSO 和 IBA 算法, 收敛速度较快, 仅需约 8.5 min 运行时间且优化后总成本最小。

表 4 6 种算法的优化结果对比

Table 4 Comparison of optimization result among six algorithms

算法	运行时间/s			收敛代数/次			收敛时间/s			优化成本/亿元		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
APSO	1 956	1 943	1 951	1 807	<b>206</b>	<b>1 039</b>	1 762.73	201.37	1 013.54	1.545 1	1.455 1	1.500 9
IBA	1 068	1 059	1 064	1 868	311	1 276	995.64	165.14	679.38	1.553 4	1.475 2	1.496 5
SSA	<b>450</b>	442	446	1 829	410	1 269	<b>408.78</b>	91.43	<b>283.23</b>	1.531 2	1.480 6	1.498 4
PSO	451	<b>440</b>	<b>444</b>	1 853	747	1 404	415.07	165.83	311.74	1.550 1	1.491 1	1.508 0
BA	461	454	458	1 825	377	1 300	419.75	<b>85.96</b>	298.01	1.543 2	1.485 6	1.506 3
ISSA	512	506	509	<b>1 713</b>	712	1 193	438.53	180.85	303.98	<b>1.503 6</b>	<b>1.445 1</b>	<b>1.469 2</b>

### 4 结论

针对大型海上风电场电缆布置优化问题的高复杂度特点, 提出基于改进麻雀搜索算法的电缆布置优化方法。经案例验证与结果分析, 得出如下结论:

1) 针对大型海上风电场的电缆布置优化问题, ISSA 结合 Prim 算法进行初始化。经验证, ISSA 中的初始化环节相对于随机初始化更有效, 显著提升了优化效果。

2) 电缆布置优化结果表明, 考虑线路损耗成本, 同时优化电缆型号可平衡各成本项, 得到更低的优化成本。海上变电站位置影响电缆拓扑和电缆型号, 且主要在电缆敷设长度方面影响电缆成本。

3) 通过对比 ISSA 与 SSA, 仿真案例验证了 ISSA 的有效性; 与 IBA、APSO 算法对比发现, ISSA 具有更强的寻优能力。

文中仅针对树状拓扑进行优化, 其他拓扑结构有待研究。此外, 优化模型中未考虑风机位置的可变性, 结合风机的微观选址进行优化预计可以得到更好的优化结果。

### 参考文献

[1] 史加荣, 赵丹梦, 王琳华, 等. 基于 RR-VMD-LSTM 的短期风电功率预测[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 63-70.

SHI Jiarong, ZHAO Danmeng, WANG Linhua, et al. Short-term wind power prediction based on RR-VMD-LSTM[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 63-70.

[2] MADHIARASAN M. Accurate prediction of different forecast horizons wind speed using a recursive radial basis function neural network[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(3): 230-238.

[3] 彭华, 王文超, 朱永利, 等. 基于 LSTM 神经网络的风电场集电线路单相接地智能测距[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(16): 60-66.

PENG Hua, WANG Wenchao, ZHU Yongli, et al. An intelligent single-phase grounding fault location for a wind farm collection line based on an LSTM neural network[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(16): 60-66.

[4] 周计晨, 吕胤杰, 杨诚之, 等. 考虑风电出力不确定性的分布鲁棒主备协同优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(20): 66-73.

ZHOU Jichen, LÜ Yinjie, YANG Chengzhi, et al. Distributionally robust co-optimization of energy and reserve dispatch considering uncertain wind power output[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(20): 66-73.

[5] 薛帅, 高厚磊, 郭一飞, 等. 大规模海上风电场的双层分布式有功控制[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(3):

- 1-9.  
XUE Shuai, GAO Houlei, GUO Yifei, et al. Bi-level distributed active power control for a large-scale wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(3): 1-9.
- [6] AMARAL L, CASTRO R. Offshore wind farm layout optimization regarding wake effects and electrical losses[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2017, 60: 26-34.
- [7] HOU P, ZHU J, KUICHAO M A, et al. A review of offshore wind farm layout optimization and electrical system design methods[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(5): 975-986.
- [8] DUTTA S, OVERBYE T J. Optimal wind farm collector system topology design considering total trenching length[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(3): 339-348.
- [9] GONZALEZ-LONGATT F M, WALL P, REGULSKI P, et al. Optimal electric network design for a large offshore wind farm based on a modified genetic algorithm approach[J]. IEEE Systems Journal, 2012, 6(1): 164-172.
- [10] WANG Long, WU Jianghai, WANG Tongguang, et al. An optimization method based on random fork tree coding for the electrical networks of offshore wind farms[J]. Renewable Energy, 2020, 147: 1340-1351.
- [11] QI Yuanhang, HOU Peng, YANG Liang, et al. Simultaneous optimisation of cable connection schemes and capacity for offshore wind farms via a modified bat algorithm[J]. Applied Sciences, 2019, 9(2): 265-275.
- [12] 李芑达, 李东东. 海上风电场集电系统拓扑结构优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 102-107.  
LI Pengda, LI Dongdong. Study on topology optimization of electrical collector system for offshore wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 102-107.
- [13] LUMBRERAS S, RAMOS A. Optimal design of the electrical layout of an offshore wind farm applying decomposition strategies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 1434-1441.
- [14] PEREZ-RUA J A, STOLPE M, DAS K, et al. Global optimization of offshore wind farm collection systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(3): 2256-2267.
- [15] WEI Shurong, ZHANG Lu, XU Yao, et al. Hierarchical optimization for the double-sided ring structure of the collector system planning of large offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2017, 8(3): 1029-1039.
- [16] JIN R, HOU P, YANG G, et al. Cable routing optimization for offshore wind power plants via wind scenarios considering power loss cost model[J]. Applied Energy, 2019, 254.
- [17] XUE Jiankai, SHEN Bo. A novel swarm intelligence optimization approach: sparrow search algorithm[J]. Systems Science & Control Engineering, 2020, 8(1): 22-34.
- [18] 李雅丽, 王淑琴, 陈倩茹, 等. 若干新型群智能优化算法的对比研究[J]. 计算机工程与应用, 2020, 56(22): 1-12.  
LI Yali, WANG Shuqin, CHEN Qianru, et al. Comparative study of several new swarm intelligence optimization algorithms[J]. Computer Engineering and Applications, 2020, 56(22): 1-12.
- [19] MENG Xianbing, LIU Yu, GAO Xiaozhi, et al. A new bio-inspired algorithm: chicken swarm optimization[C] // International Conference in Swarm Intelligence, October 17-20, 2014, Hefei, China: 86-94.
- [20] 刘刚, 曹京荣, 陆莹, 等. 以全寿命周期成本为判据的近海风电场高压海底电缆选型标准[J]. 高电压技术, 2015, 41(8): 2674-2680.  
LIU Gang, CAO Jingying, LU Ying, et al. Selection criteria of high-voltage submarine cables for offshore wind farms by life cycle cost[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(8): 2674-2680.
- [21] 王健东, 李国杰. 海上风电场内部电气系统布局经济性对比[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 99-103.  
WANG Jiandong, LI Guojie. Economic comparison of different collector networks for offshore wind farms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 99-103.
- [22] 曹云. 风电场规划设计与施工[M]. 2版. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
- [23] KAISER M J, SNYDER B F. Offshore wind energy cost modeling: Installation and decommissioning[M]. Springer Science & Business Media, 2012.
- [24] 帅军庆. 电力企业资产全寿命周期管理: 理论, 方法及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.

收稿日期: 2021-11-11; 修回日期: 2022-02-13

作者简介:

宋冬然(1983—), 男, 工学博士, 副教授, 研究方向为新能源控制技术, 能源/电气系统经济分析及优化; E-mail: humble\_szy@163.com

夏鄂(1977—), 男, 通信作者, 工学硕士, 实验员, 研究方向为新能源发电及人工智能技术。E-mail: 1250971700@qq.com

(编辑 葛艳娜)