

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.200393

基于改进人工蜂群算法的直流配电网典型应用场景 拓扑结构研究

陈鹏浩¹, 李慧璇², 李 猛², 王利利², 吕盈睿³, 张天东³, 李雪松³, 尹 杰³, 胡 钊³

(1. 国网河南省电力公司, 河南 郑州 450000; 2. 国网河南省电力公司经济技术研究院, 河南 郑州 450052;
3. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 为了解决直流配电网规划中场景针对性不强的问题, 给出了不同场景下直流配电网的网络拓扑结构规划方案。将直流配电网应用场景分为居民住宅区、工业园区和新能源集结区, 考虑不同应用场景的特点, 利用层次分析法提出一种新的可靠性指标计算方法。结合变权的思想, 综合考虑电网的经济性和可靠性, 给出了直流配电网的规划模型。利用由最大最小积改进的人工蜂群算法, 以 IEEE 标准 14 节点电路为对象, 对三种场景下的规划模型进行寻优, 并利用 griewank 函数对比了改进前后算法的性能。仿真结果表明, 所得线路规划方案满足各场景要求, 改进后的蜂群算法收敛速度和精度均有提升。所提方法可为直流配电网规划提供参考。

关键词: 直流配电网; 拓扑结构; 应用场景; 人工蜂群算法; 网络规划

Research on the topological structure of typical application scenarios of a DC distribution network based on improved artificial bee colony algorithm

CHEN Penghao¹, LI Huixuan², LI Meng², WANG Lili¹, LÜ Yingrui³, ZHANG Tiandong³, LI Xuesong³, YIN Jie³, HU Po³
(1. State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450000, China; 2. State Grid Henan Economic Research Institute, Zhengzhou 450052, China; 3. School of Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: In order to solve the problem that the scenario of a DC distribution network planning is not well targeted, the network topology planning scheme of a DC distribution network in different scenarios is proposed. The application scenarios of a DC power grid are divided into residential areas, industrial parks and new energy concentration areas. For different application scenarios, a new reliability index calculation method is proposed using AHP. Combined with the idea of variable weight and considering the economy and reliability of a power grid comprehensively, the planning model of a DC power grid planning is developed. Using the improved artificial bee colony algorithm of maximum and minimum product, taking IEEE standard 14 node circuit as the object, this paper optimizes the planning model in three scenarios, and compares the performance of the algorithm before and after the improvement with the griewank function. The simulation results show that the route planning scheme meets the requirements of each scene, and the convergence speed and accuracy of the improved bee colony algorithm are enhanced. The method proposed in this paper can provide a reference for DC distribution network planning.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51777142) and the Science and Technology Project of State Grid Henan Electric Power Company (No. 5217L018000N).

Key words: DC distribution network; topology; application scenario; artificial bee colony algorithm; network planning

0 引言

随着电力电子技术的进步, 直流配电网具有广

阔的发展前景, 而直流配电网的网络结构的确定是直流配电网建设的基础^[1-3]。相关学者在配电网网络结构的规划方面做了一定研究。文献[4]将线路投资、运行维护、网损等传统经济性指标与碳排放环境成本相结合作为目标, 建立配电网网架规划模型, 并将分布式电源和柔性负荷的作用纳入规划模型,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51777142); 国网河南省电力公司科技项目资助(5217L018000N)

得到较好的结果,但是没有考虑配电网的可靠性。对此,也有相关学者计及可靠性做了研究。文献[5]采用网络等值法对配电网的可靠性进行评估,并给出了可靠性指标的计算方法。文献[6]利用全寿命周期模型兼顾电网规划的可靠性和经济性。但是,上述研究均未考虑配电网在不同应用场景下的特殊性,因而针对性不强。此外,目标函数各成本之间的权重取定值,忽略了某一项指标过大时产生的影响。

针对上述问题,本文给出三种常见应用场景并根据其特点进行规划,提出新的可靠性衡量指标并引入变权方法,针对人工蜂群算法收敛速度慢,利用最大最小积法对其进行改进,以提高其收敛速度,并以 IEEE 标准 14 节点电路为对象进行算例仿真。

1 目标函数与约束条件

1.1 经济性指标

配电网的经济性是配电网规划的一个重要部分,传统交流配电网的经济性指标主要包括线路建设成本、线路损耗成本等。相较于此,直流配电网线路损耗较低,但是却需要考虑换流设备损耗,此外,由于直流配电网加入了分布式电源,因此在进行经济性分析时,还需要考虑环境效益和节能效益。

经济性计算式为

$$C_j = C_{\text{net}} + C_{\text{gl}} - C_V \quad (1)$$

式中: C_{net} 为线路建设成本; C_{gl} 为损耗成本; C_V 为环保节能所带来的等效经济效益。

对式(1)中三项成本分别说明如下。

1) 直流配网线路建设成本

$$C_{\text{net}} = \mu \sum_{i,j \in \varphi} l_{ij} L_{ij} \quad (2)$$

式中: μ 为单位长度线路建设成本; l_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的距离; L_{ij} 表示节点 i 与节点 j 之间是否存在连接关系,若两节点相连,则 $L_{ij} = 1$,反之, $L_{ij} = 0$; φ 为待规划网络的节点集合。

2) 损耗成本

直流配网的损耗成本与系统网络损耗成正比,其计算式为

$$C_{\text{gl}} = c_s \cdot P_{\text{loss}} \quad (3)$$

式中: c_s 为单位电量损耗费用; P_{loss} 为系统网络损耗,主要包括线路损耗以及换流设备损耗。

3) 环保效益

直流配电网加入光伏电池、风机等分布式电源,用太阳能、风能等清洁能源代替传统煤炭资源,分

布式电源出力较高,可以减少煤炭等化石燃料使用量,间接带来经济收益。等效经济效益计算式为

$$C_V = \eta \cdot (c_{em} + m)Q \quad (4)$$

式中: η 为单位煤炭使用成本; Q 为分布式电源总发电量; c_{em} 为火电机组生产单位电量的污染物排放系数; m 为火电机组生产单位电量所消耗煤炭量。

1.2 可靠性指标

可靠性是衡量直流配电网优劣的一项重要指标,较为常用的可靠性指标为故障停电率、停电持续时间、缺电成本等^[7-10]。但是,本文考虑到配电网可靠性主要受负荷的重要程度、负荷大小、负荷平均缺电时长等因素影响,因此选取这些指标来表示可靠性,即

$$C_k = \gamma \sum_{j=1}^n t_{\text{loss}} p_{cj} I_{mj} P_j \quad (5)$$

式中: C_k 为与可靠性等价的成本; γ 为转换系数; t_{loss} 为平均停电时间,其与故障排查时间、线路修复时间有关; p_{cj} 为节点 j 处的负荷停电概率; I_{mj} 为节点 j 处负荷的重要度; P_j 为节点 j 处负荷大小。

负荷停电概率计算式为

$$p_{cj} = \frac{\text{size}(\Omega_j)}{\text{size}(\Omega)} \quad (6)$$

式中: Ω 为所有可能的故障集合; Ω_j 为节点 j 处负荷停电的故障集合。

电力负荷分为工业、农业、商业和生活 4 类典型负荷^[11],其重要度与它的属类有关。不同类型负荷停电所造成的影响各异,因而其在电网中的重要度也不同。层次分析法^[12-14]根据专家经验比较各类负荷之间的相对重要等级,可以得到各类负荷的重要度。

层次分析法的主要计算步骤如下所述。

1) 根据各类负荷之间的相对重要等级构建判断矩阵。各级重要性对应的判断尺度如表 1 所示。

表 1 各级重要性对应的判断尺度

Table 1 Judgment scale corresponding to importance	
判断尺度	定义
1	因素 u_i 与 u_j 相比具有同样的重要性
3	因素 u_i 与 u_j 相比, u_i 比 u_j 稍微重要
5	因素 u_i 与 u_j 相比, u_i 比 u_j 明显重要
7	因素 u_i 与 u_j 相比, u_i 比 u_j 强烈重要
9	因素 u_i 与 u_j 相比, u_i 比 u_j 极端重要
2,4,6,8	介于上述两个相邻判断尺度之间

将 4 类负荷运行情况对照表 1 确定其相对重要等级,如表 2 所示。

表 2 4 类负荷相对重要等级

Table 2 Relative importance of four loads

负荷类别	工业负荷	农业负荷	商业负荷	生活负荷
工业负荷	1	2	1	5
农业负荷	1/2	1	1/2	3
商业负荷	1	2	1	5
生活负荷	1/5	1/3	1/5	1

构造判断矩阵为

$$D = \begin{bmatrix} 1 & 2 & 1 & 5 \\ 1/2 & 1 & 1/2 & 3 \\ 1 & 2 & 1 & 5 \\ 1/5 & 1/3 & 1/5 & 1 \end{bmatrix} \quad (7)$$

2) 计算判断矩阵的特征值与特征向量, 最大特征值所对应的特征向量即为 4 类负荷的重要度。

将式(7)最大特征值所对应的特征向量标准化, 得到 4 类负荷的重要度, 即

$$I_m = [0.3683 \ 0.1929 \ 0.3683 \ 0.0704] \quad (8)$$

3) 一致性检验。由层次分析法确定的重要度是否合理需要经过一致性检验, 其通过条件为

$$C_R < 0.1 \quad (9)$$

其中

$$\begin{cases} C_I = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \\ C_R = C_I / R_I \end{cases} \quad (10)$$

式中, n 为判断矩阵的阶数。对本文 $n = 4$ 的情况, R_I 取 0.9。

式(7)中判断矩阵的最大特征值 $\lambda_{\max} = 4.0042$, 由此计算得 $C_R = 0.0016 < 0.1$, 因此通过一致性检验。

1.3 目标函数

综合考虑经济性成本与可靠性成本, 确定目标函数为

$$\min C = w_1 C_k + w_2 C_j \quad (11)$$

式中: C 为总成本; w_1 、 w_2 分别为可靠性与经济性权重系数。若配电网规划方案的经济性、可靠性过低, 则需要加大其权重, 以提高它们对配电网的影响, 因此本文利用 sigmoid 函数^[15-16]实现变权重, 即

$$\beta_i = \begin{cases} w_{i0} & C_i < C_{i0} \\ (2w_{i0} - 1) + \frac{2(1 - w_{i0})}{1 + e^{-(C_i - C_{i0})/\alpha}} & C_i \geq C_{i0} \end{cases} \quad (12)$$

$$w_j = \frac{\beta_j}{\beta_1 + \beta_2} \quad (j = 1, 2) \quad (13)$$

式中: α 为调节系数, 根据可靠性成本与经济性成本值确定; w_{i0} 为初始权重。规划时经济性可靠

性所占比重与电网中负荷种类有关, 重要度高的负荷占比越大, 则可靠性占比越高, 反之, 则需更多考虑经济性, 因此, 可靠性和经济性初始权重 w_{10} 、 w_{20} 计算式分别为

$$\begin{cases} w_{10} = 0.5 + \frac{\sum_{j=1}^N I_{mj} - N \bar{I}_m}{N} \\ w_{20} = 1 - w_{10} \end{cases} \quad (14)$$

式中: N 为待规划网络节点个数; \bar{I}_m 为式(8)中各值的平均值。

可靠性成本的权重随其值的变化规律如图 1 所示。在可靠性成本较低时, 按初始权重计算, 当可靠性成本超过某一值 C_{k0} 时, 其权重系数随着可靠性成本增加而增加, 考虑到经济性不可忽视, 所以可靠性的权重系数会趋于一定值。类似地可以得到经济性成本的变权曲线。

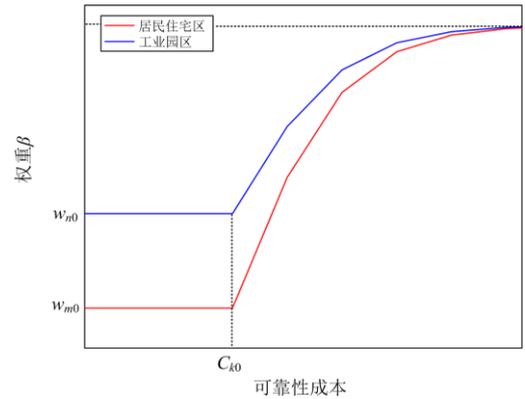


图 1 两种场景下可靠性成本权重的变化规律

Fig. 1 Change rule of reliability cost weight in two scenarios

1.4 约束条件

1) 连通性约束

正常运行情况下配电网是连通的, 而不会分成各个独立的系统运行, 因此必须进行连通性判断, 筛选出不满足连通性的规划方案^[17]。

2) 过负荷约束

任意一条线路输送的功率 S_i 都不应超过其最大容量 $S_{i\max}$, 即

$$S_i \leq S_{i\max} \quad (15)$$

2 典型应用场景

不同类别的负荷对供电可靠性和电压等级的要求不同。因此, 需要基于直流系统供电的特点, 根据负荷特点以及电网建设任务, 将直流配网分为不同应用场景, 针对不同场景的需求进行规划^[18]。常

见的典型应用场景分为3类：居民住宅区、工业园区、新能源集结区^[19-21]。

居民住宅区以居民负荷为主，其电压等级主要由空调、变频洗衣机等家用电器的电压确定。其对供电可靠性要求相对较低，停电不会造成过大的经济损失，所以在进行电网规划时，以经济性为主要目标，同时考虑到接线简便、便于操作，多采用辐射型接线方式。

工业园区以工业直流负载为主，其电压等级一般在750 V~1.5 kV之间。其对供电可靠性要求较高，停电会造成较大的经济损失，所以在进行规划时应着重考虑其可靠性。该场景宜采用双端电源供电或环型接线等可靠性较高的接线方式。

新能源集结区以汇集风力、光伏等分布式电源为主要目的，进行集中供电^[22]，其中各类型分布式电源通过换流设备进行连接。相较于工业园区与居民住宅区，新能源集结区分布式电源占比大，为了方便分布式电源接入，该应用场景一般采用环形接线方式。

不同应用场景下，分布式电源分布不同，故而其出力亦不同，因此，由式(4)可知，所得的环保收益也不同；此外，不同应用场景下，各类负荷占比不同，由式(14)可见，此时经济性成本与可靠性成本之间的初始权重系数也不同。因此，分不同场景进行网络拓扑结构规划是必要的。

3 改进的人工蜂群算法

3.1 人工蜂群算法

人工蜂群算法(ABC)^[23-24]是模拟蜜蜂寻找蜜源的优化算法，其主要由4个最基本的要素组成：食物源、采蜜蜂、观察蜂、侦察蜂^[25]。在标准的ABC算法中，采蜜蜂利用初始的食物源信息寻找新的食物源，同时回蜂巢与观察蜂分享蜜源信息；观察蜂在蜂巢中等待，并有一定概率跟随归来的采蜜蜂一起寻找新的食物源；侦察蜂负责在蜂巢附近随机寻找一个新的有价值的食物源。其中，采蜜蜂和观察蜂数量相等且等于食物源数量，采蜜蜂与食物源一一对应。

人工蜂群算法的一般步骤如下所述^[26]。

步骤1 设置种群数、最大迭代次数 MCN 、控制参数 $limits$ ，确定搜索空间即解的范围，在搜索空间中随机生成初始解 $x_i (i=1,2,3,\dots,Z_N)$ ， Z_N 为食物源个数。

步骤2 计算每只蜜蜂的适应度，并按其大小排序，将前半作为采蜜蜂，后半作为观察蜂。

步骤3 采蜜蜂根据位置更新式对其所在邻域

进行搜索，得到新的位置。位置更新式为

$$V_{ij} = X_{ij} + \phi_{ij}(X_{ij} - X_{kj}) \quad (16)$$

式中： V_{ij} 为第 j 次迭代后采蜜蜂 i 新搜索的食物源； X_{ij} 为第 j 次迭代后采蜜蜂 i 的位置； X_{kj} 为采蜜蜂 k 的位置； k 为 $[1, Z_N]$ 之间的随机整数且 $k \neq i$ ； ϕ_{ij} 为 $[-1,1]$ 之间的随机数。

步骤4 按照贪婪选择原则，如果新位置的适应度大于原位置的适应度，则用新位置更新原位置；否则，保持原位置不变。贪婪选择计算式为

$$X_{i,j+1} = \begin{cases} V_{ij} & \text{fit}(V_{ij}) > \text{fit}(X_{ij}) \\ X_{ij} & \text{fit}(V_{ij}) < \text{fit}(X_{ij}) \end{cases} \quad (17)$$

式中， $\text{fit}(X_{ij})$ 、 $\text{fit}(V_{ij})$ 分别为采蜜蜂当前位置食物源的适应度与新搜索的食物源的适应度。

步骤5 观察蜂根据概率 P_{ij} 并基于轮盘赌原则选择采蜜蜂，原则上， P_{ij} 越大，表明采蜜蜂 i 的适应度值越大，被观察蜂选中的概率也越大。概率 P_{ij} 计算式为

$$P_{ij} = \frac{\text{fit}(X_{ij})}{\sum_{i=1}^{Z_N} \text{fit}(X_{ij})} \quad (18)$$

当观察蜂完成采蜜蜂选择后，利用式(16)对邻域搜索，同样按照贪婪选择原则选择适应度高的位置。

步骤6 若某采蜜蜂在 $limits$ 次迭代后，其位置仍未更新，则由采蜜蜂变为侦察蜂，并随机产生一个新的位置取代原位置。

步骤7 若当前迭代次数大于最大次数 MCN ，则迭代结束，算法结束；否则转向步骤2。

在直流配电网拓扑结构规划问题中，采蜜蜂、观察蜂的位置代表一种规划方案，采蜜蜂和观察蜂与对搜索空间中不同位置点的重视程度相关联，是计算资源在空间中各个位置点的优化分配方式的数学抽象载体。每个位置的适应度则代表此规划方案的目标函数值，式(17)表明直流配电网规划是寻找综合成本 C 的最小值，而贪婪选择原则以及轮盘赌原则则要求寻找适应度的最大值，因此求适应度时，对综合成本取倒数，即以综合成本的倒数作为适应度值。人工蜂群算法不断搜寻适应度较大的位置，亦即综合成本最小的方案，通过一定次数的迭代可以输出最优规划方案以及其所对应的适应度，进而求得综合成本的大小。

3.2 改进的人工蜂群算法

本文对人工蜂群算法进行改进以解决其收敛速度慢的问题^[27]。人工蜂群算法的收敛速度主要取决

于种群的初始化, 若初始种群位置分布合理则可以大大加快收敛速度且减少陷入局部最优的可能性。本文利用最大最小积法来优化种群的初始化过程, 即根据最大最小积最大的原则来选取初始蜂群, 以使初始蜂群位置分布尽可能分散, 其步骤如下。

步骤 1 随机选取 Z_M ($Z_M \gg Z_N$) 个初始位置构成集合 M , 从中随机选取一个位置作为第一个初始位置, 令其加入集合 Z 并从 M 中将它删除。

步骤 2 从更新后的 M 中选取到第一个初始位置距离最大的位置, 将此位置加入集合 Z 同时将其从集合 M 中删除。

步骤 3 分别计算更新后 M 中位置 M_i ($i=1, 2, \dots, Z'_M$, Z'_M 为更新后 M 中位置的个数) 到 Z 中各元素的距离, 计算距离最大值与最小值之积, 从中选取最大乘积所对应的 M 中的位置并将其存入 Z , 同时从 M 中将该位置删除。

步骤 4 判断所选取的初始位置个数即集合 Z 中位置个数是否小于 Z_N , 若是, 则重复步骤 2; 若非, 则直接输出集合 Z 中 Z_N 个初始位置作为改进蜂群算法的初始位置。

此外, 位置更新式(16)具有迭代随机性、易陷入局部最优解、更新速度慢的缺点^[28], 因此引入全局最优因子即最佳适应度所对应的位置 $X_{best,j}$ 对式(16)进行改进, 改进后的位置更新式为

$$V_{ij} = X_{ij} + \phi_{ij}(X_{mj} - X_{kj}) + \psi_{ij}(X_{best,j} - X_{ij}) \quad (19)$$

式中: m 、 k 为随机数且不等于 i ; ϕ_{ij} 、 ψ_{ij} 为 $[-1, 1]$ 之间的随机数。

基于以上两点所得到的改进的人工蜂群算法的流程图如图 2 所示。

4 算例仿真

本文应用基于文献[29]修改后得到的 IEEE14 节点直流配电网, 针对各应用场景的特点, 分别进行线路规划, 其中分布式电源出力取其年平均值。选取采蜜蜂和观察蜂数量为 40, 种群数量为 100, 寻优迭代次数为 100。

对于居民住宅区, 节点 2、3、4、5、7、9 接入分布式光伏, 各节点负荷如表 3 所示。

表 3 居民住宅区负荷类别

Table 3 Load category of residential scenarios

负荷类别	负荷节点
工业负荷	2、3
农业负荷	6、7
商业负荷	4
生活负荷	10、11、12、13、14

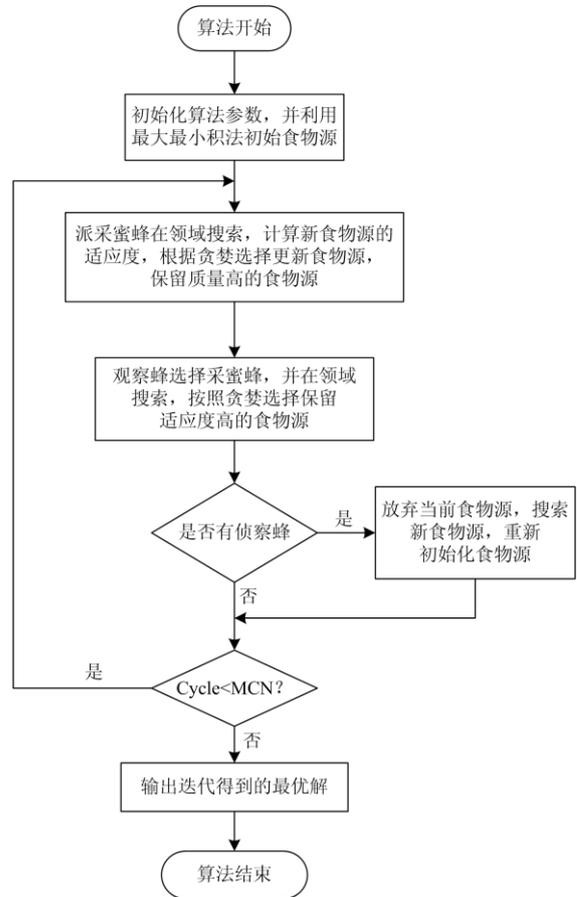


图 2 改进的人工蜂群算法流程图

Fig. 2 Flow chart of improved artificial bee colony algorithm

对线路规划方案进行寻优, 得到最优方案如图 3 所示。

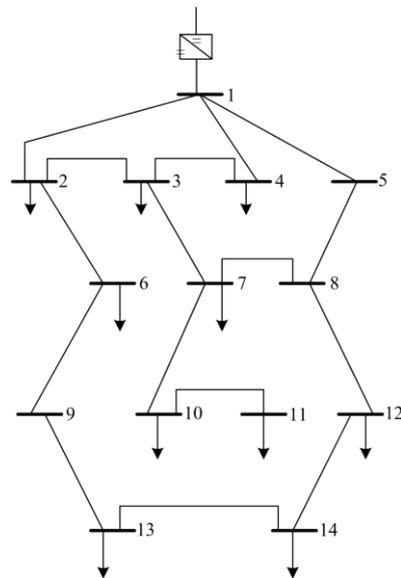


图 3 居民住宅区场景下的规划线路

Fig. 3 Planned routes in residential scenarios

对于以工业负荷为主的工业园区，节点 2、3、4、5、7、9 接入分布式光伏，各节点负荷如表 4 所示。

表 4 工业园区负荷类别

Table 4 Load category of industrial park scenarios

负荷类别	负荷节点
工业负荷	2、3、4、7、9
农业负荷	6
商业负荷	11、12、13
生活负荷	14

对线路规划方案进行寻优，得到最优方案如图 4 所示。

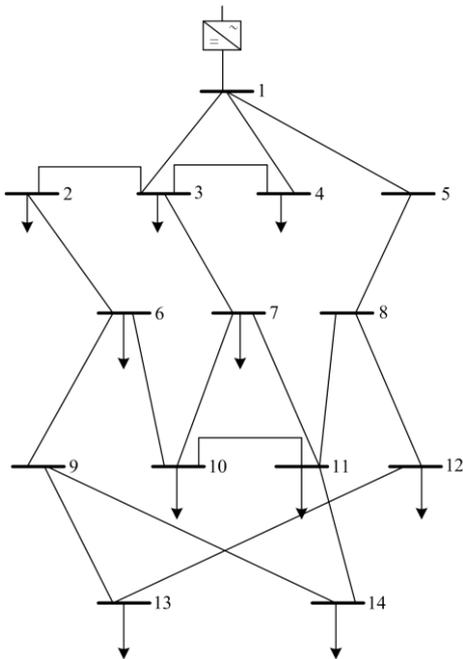


图 4 工业园区场景下的规划线路

Fig. 4 Planned routes in industrial park scenarios

可以看出，图 4 中的接线比图 3 中的更为复杂，这是由于工业园区中工业负荷占比较高，相应地，由式(8)和式(14)可知，其可靠性占有较大权重，因此需要提高经济性成本来降低可靠性成本，从而满足工业园区对可靠性的较高要求。

新能源集结区除节点 13、14 外，其余节点均接有分布式电源，集中向节点 13、14 处负荷供电。

对线路规划方案进行寻优，得到最优方案如图 5 所示。

为了验证本文所用方法的可行性，以居民住宅区为例，用传统规划方法进行规划，即不考虑负荷重要度且采用定权重计算，并与本文所用方法的结果进行比较。传统方法规划结果如图 6 所示，各成本数值见表 5。

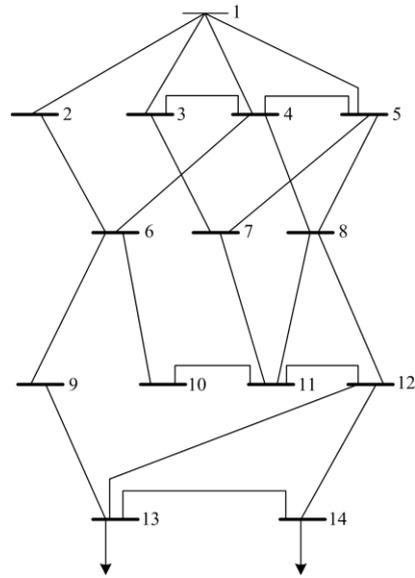


图 5 新能源集结区场景下的规划线路

Fig. 5 Planned routes in the scenario of new energy concentration area

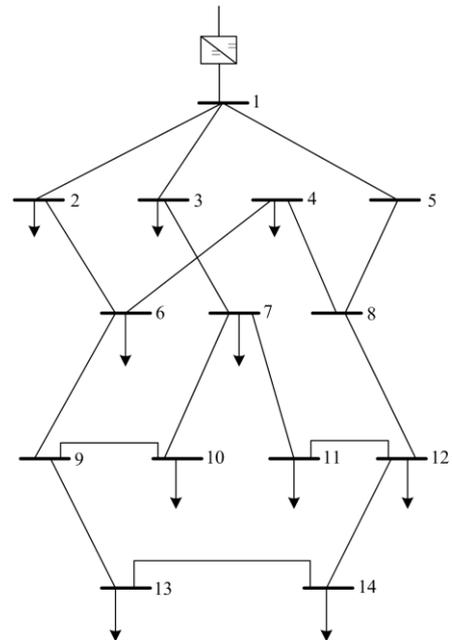


图 6 采用传统方法的居民住宅区场景下的规划线路

Fig. 6 Planning route of residential area calculated by traditional method

表 5 传统方法与本文方法规划结果比较

Table 5 Comparison of the planning results between the traditional method and the method in this paper

	可靠性成本/万元	经济性成本/万元
传统方法	2 431.2	2 690.9
本文方法	2 559.1	2 390.7

比较图 3 和图 6 可知, 图 6 中的接线较图 1 中的复杂, 因而经济性成本偏高, 这是因为传统规划方法中的权重是固定的, 因而会导致经济性或可靠性成本过高。此外, 传统规划线路中, 重要度较高的负荷节点 2、3、4 的接线简单, 无法保证供电可靠性, 而重要度较低的负荷节点 10、12 的接线反而复杂, 增大了经济性成本, 这是因为传统规划方法未考虑各负荷的重要度所致。

作为改进前后算法的对比, 选取 `griewank` 函数寻优, 结果如图 7 所示。可见改进后的算法在得到最优解时所用迭代次数较少, 为 87 次左右, 而且最优值更低。

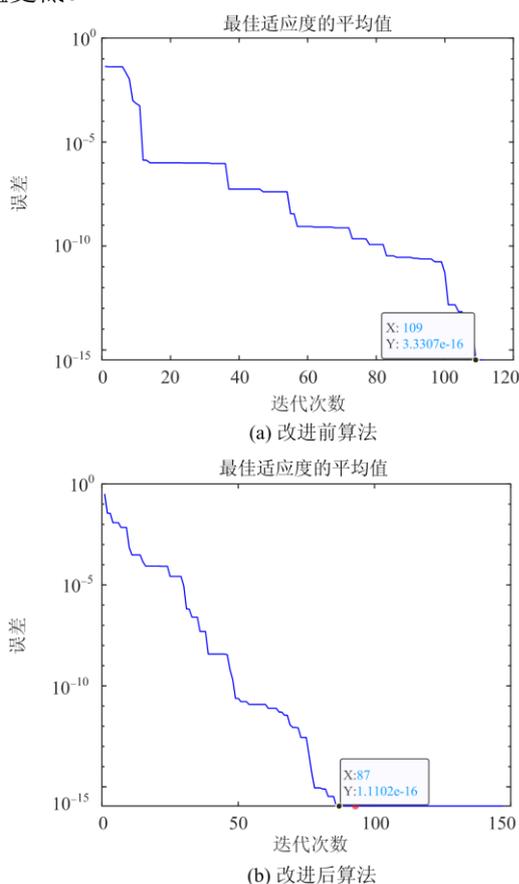


图 7 算法改进前后结果比较

Fig. 7 Comparison of algorithm results before and after improvement

5 结论

本文根据不同应用场景对直流配电网线路规划进行研究, 并在各应用场景下, 分别对直流配电网网络拓扑结构进行规划, 选取建设成本、损耗成本以及环保收益作为经济性指标, 并提出一种新的可靠性指标计算方法, 引入变权方法构造目标函数, 并利用由最大最小积改进的人工蜂群算法进行寻

优。将 IEEE 标准 14 节点电路置于各应用场景进行算例分析, 所得结果符合相关场景的要求。改进前后的人工蜂群算法的对比分析结果表明本文所提出方法在提高收敛速度的同时能得到更优的规划结果。

参考文献

- [1] 孙鹏飞, 贺春光, 邵华, 等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 64-73.
- [2] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17, 24.
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17, 24.
- [3] 白冰, 崔赫, 王姝惠, 等. 直流配电网研究现状与展望[J]. 科技创新导报, 2018, 15(11): 60-62.
BAI Bing, CUI He, WANG Shuhui, et al. Research status and prospects of DC distribution networks[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2018, 15(11): 60-62.
- [4] 张植华, 李健, 林毓, 等. 网格化城市配电网目标网架动态构建方法[J]. 陕西电力, 2015, 43(2): 23-29.
ZHANG Zhihua, LI Jian, LIN Yu, et al. Target grid dynamic construction method for gridding urban distribution network[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(2): 23-29.
- [5] 周云海, 曹小伟, 危雪. 基于网络等值法的配电网可靠性研究[J]. 广东电力, 2008, 22(1): 11-16.
ZHOU Yunhai, CAO Xiaowei, WEI Xue. Research based on reliability-network-equivalent of distribution system[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 22(1): 11-16.
- [6] 于立杰, 董沛毅. 多端柔性直流配电网运行策略优化研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 72-78, 87.
YU Lijie, DONG Peiyi. Operation strategy optimization of multi-terminal flexible DC distribution network[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 72-78, 87.
- [7] 苏卫华, 管俊, 杨熠娟, 等. 全生命周期成本电网规划的灵敏度分析模型[J]. 中国电力, 2014, 47(11): 127-133.
SU Weihua, GUAN Jun, YANG Yijuan, et al. Research on sensitivity analytical model of life cycle cost for power grid planning[J]. Electric Power, 2014, 47(11): 127-133.
- [8] 韦永忠, 张宇, 朱孟周, 等. 考虑分布式电源贡献度的单元制主动配电网供电可靠性评估[J]. 智慧电力, 2019, 47(7): 84-90.
WEI Yongzhong, ZHANG Yu, ZHU Mengzhou, et al. Power supply reliability evaluation for active distribution unit considering DG contribution index[J]. Smart Power,

- 2019, 47(7): 84-90.
- [9] GANGULY S, SAHOO N C, DAS D. Multi-objective planning of electrical distribution systems using dynamic programming[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2013, 46: 65-78.
- [10] SAMUI A, SINGH S, GHOSE T, et al. A direct approach to optimal feeder routing for radial distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 253-260.
- [11] 李亮, 唐巍, 白牧可, 等. 考虑时序特性的多目标分布式电源选址定容规划[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(3): 58-63, 128.
LI Liang, TANG Wei, BAI Muke, et al. Multi-objective locating and sizing of distributed generators based on time-sequence characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(3): 58-63, 128.
- [12] WANG X, DUAN Q. Improved AHP-TOPSIS model for the comprehensive risk evaluation of oil and gas pipelines[EB/OL].[2019]. <https://doi.org/10.1007/s12182-019-00365-5>.
- [13] 周剑, 罗添允, 李智勇, 等. 基于改进可拓层次分析的停电影响综合评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(3): 31-38.
ZHOU Jian, LUO Tianyun, LI Zhiyong, et al. Comprehensive evaluation of power failure based on improved extension analytic hierarchy process[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(3): 31-38.
- [14] 冯新龙, 孙岩, 林声宏, 等. 配电网综合评价指标体系及评估方法[J]. 广东电力, 2013, 26(11): 20-25, 53.
FENG Xinlong, SUN Yan, LIN Shenghong, et al. Comprehensive evaluation index system of distribution network and evaluation method[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(11): 20-25, 53.
- [15] 高旭, 马迎新, 汤小兵, 等. 基于 Matlab 神经网络算法的智能变电站光纤回路自学习及自动设计的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(22): 159-167.
GAO Xu, MA Yingxin, TANG Xiaobing, et al. Study on self-learning and automatic design of smart station's fiber optic circuit based on Matlab neural network algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(22): 159-167.
- [16] 纪广月. 基于云计算和 GA-BP 神经网络的西江水质评价研究[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2020, 48(3): 34-40.
JI Guangyue. Study on water quality evaluation of Xijiang river based on cloud computing and GA-BP neural network[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2020, 48(3): 34-40.
- [17] 张杰, 徐海刚, 王晓刚. 基于电气连通性分析的复杂配电网可靠性评估算法[J]. 科学技术与工程, 2014, 14(18): 52-58.
ZHANG Jie, XU Haigang, WANG Xiaogang. Complex distribution network reliability evaluation based on electrical connectivity analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2014, 14(18): 52-58.
- [18] 高泽璞, 赵云, 余伊兰, 等. 基于知识图谱的低压配电网拓扑结构辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 34-43.
GAO Zekun, ZHAO Yun, YU Yilan, et al. Low-voltage distribution network topology identification method based on knowledge graph[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 34-43.
- [19] 盛万兴, 李蕊, 李跃, 等. 直流配电电压等级序列与典型网络架构初探[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3391-3403, 3358.
SHENG Wanxing, LI Rui, LI Yue, et al. A preliminary study on voltage level sequence and typical network architecture of direct current distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3391-3403, 3358.
- [20] WANG Z, SU J, CUI Y, et al. Research on the structures and application scenarios of medium voltage AC-DC hybrid distribution network[C] // 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), March 15-17, 2019, Chengdu, China: 743-747.
- [21] YI Y, YUAN Z, JI Y. Research on topology of DC distribution network based on power flow optimization[C] // 2017 IEEE International Conference on Energy Internet (ICEI), IEEE, May 15, 2017, Beijing, China: 344-348.
- [22] 何后裕, 郭健翔, 王永利. 面向配电网风电消纳的冰蓄冷空调系统多目标优化策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(23): 180-187.
HE Houyu, GUO Jianxiang, WANG Yongli. Research on multi-objective optimization strategy for ice storage air conditioning system for distribution network wind power consumption[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(23): 180-187.
- [23] 刘前进, 许慧铭, 施超. 基于人工蜂群算法的多目标最优潮流问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(8): 1-7.
LIU Qianjin, XU Huiming, SHI Chao. Research on power flow optimization based on multi-objective artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(8): 1-7.
- [24] KARABOGA D. An idea based on honey bee swarm for numerical optimization, TR06[R]. Kayseri, Turkey:

- ErciErciyes University, 2005.
- [25] 陈国发, 张文庆, 刘锋, 等. 基于改进蜂群算法的含 DG 配网多目标无功优化[J]. 智慧电力, 2019, 47(3): 97-103.
CHEN Guofa, ZHANG Wenqing, LIU Feng, et al. Multi-objective reactive power optimization of distribution network with DG based on improved bee colony algorithm[J]. Smart Power, 2019, 47(3): 97-103.
- [26] 汪春峰, 蒋妍. 基于蜂群算法和遗传算法的贝叶斯网络结构混合学习方法[J]. 河南师范大学学报: 自然科学版, 2015, 43(4): 16-20.
WANG Chunfeng, JIANG Yan. A hybrid algorithm for learning bayesian network structure based on artificial bee colony and genetic algorithm[J]. Journal of Henan Normal University: Natural Science Edition, 2015, 43(4): 16-20.
- [27] 高兆丽, 胥明凯, 丁素英, 等. 基于改进人工蜂群算法的配电网多点故障应急抢修优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(13): 107-114.
GAO Zhaoli, XU Mingkai, DING Suying, et al. Optimization scheduling of multi-fault rush repair for distribution networks based on modified artificial bee colony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(13): 107-114.
- [28] 喻金平, 郑杰, 梅宏标. 基于改进人工蜂群算法的 K 均值聚类算法[J]. 计算机应用, 2014, 34(4): 1065-1069, 1088.
YU Jinping, ZHENG Jie, MEI Hongbiao. K-means clustering algorithm based on improved artificial bee colony algorithm[J]. Journal of Computer Applications, 2014, 34(4): 1065-1069, 1088.
- [29] HAN B, LI Y. Optimization method for reducing network loss of DC distribution system with distributed resource[J]. Photon Network Communication, 2019, 37: 233-242.

收稿日期: 2020-04-14; 修回日期: 2020-08-09

作者简介:

陈鹏浩(1982—), 男, 本科, 高级经济师, 研究方向为电力系统自动化、配电网工程建设管理; E-mail: 779619902@qq.com

李慧璇(1993—), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为能源互联网技术;

李 锰(1986—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为配电网规划技术。E-mail: hnlimn@163.com

(编辑 魏小丽)