

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210381

基于改进乌燕鸥算法的分布式电源优化配置

肖永江, 于永进, 张桂林

(山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘要: 对分布式电源(DG)接入配电网进行合理规划配置,能够在兼顾运营商和用户利益的同时,提高系统电压稳定性。在考虑经济指标的情况下,提出了一种新的系统电压增强指标,改善了系统整体电压分布。建立了多目标优化模型,利用层次分析法确定各目标函数的权重,进而转化成单目标函数规划问题。针对乌燕鸥算法全局搜索能力较强和局部搜索能力较弱的缺点,提出了一种新颖的改进乌燕鸥算法。将遗传算法的变异思想融入其中,进行DG的优化配置,提高了收敛速度和收敛精度。通过算例验证了改进的乌燕鸥算法对改善系统电压分布效果明显,所建立的模型有很好的实际意义。

关键词: 分布式电源; 配电网; 多目标优化; 层次分析法; 改进乌燕鸥算法

Optimal configuration of distributed power generation based on an improved sooty tern optimization algorithm

XIAO Yongjiang, YU Yongjin, ZHANG Guilin

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: Reasonable planning and configuration of distributed power generation (DG) accessing the distribution network can improve system voltage stability while taking into account the interests of operators and users. In this paper, considering economic indicators, a new system voltage enhancement indicator is proposed to improve the overall voltage distribution of the system. A multi-objective optimization model is established, and an analytic hierarchy process is used to determine the weight of each objective function, which is then transformed into a single objective function programming problem. Given the problem that the sooty tern optimization algorithm has relatively strong global search ability but its local search ability is weak, a novel and improved sooty tern optimization algorithm is proposed. It incorporates the genetic algorithm's mutation idea and optimizes the configuration of DG. This improves convergence speed and accuracy. The calculation example verifies that the improved sooty tern optimization algorithm has a good effect on improving the system voltage distribution, and the established model has good practical significance.

This work is supported by the Key Research and Development Program of Shandong Province (No. 2019GGX103049).

Key words: distributed generation; distribution network; multi-objective optimization; analytic hierarchy process; improved sooty tern optimization algorithm

0 引言

在能源问题日益严重的情况下,以可再生能源为主的DG愈发受到普遍关注。但随着DG的接入,配电网变得更加复杂,每条支路的潮流大小和方向在一定程度上会有所改变,给电网的可靠、安全运行带来了一定程度影响^[1-4]。系统的网损不仅和负荷大小有关,还和DG的优化配置有一定的关系。DG

的规划配置既能保证系统安全稳定运行,还能降低各种投资运行成本,因此研究DG合理规划有十分重要的意义^[5-12]。

目前,国内外学者对DG的选址定容从不同角度进行了研究。文献[13]对分布式电源规划问题改进了传统的遗传算法,建立多目标优化模型,使用权重系数法把多目标函数转化成单目标函数进行计算,但是该方法需要统一量纲,因为缺乏经验可能会使目标函数难以转化。文献[14]对灰狼算法进行改进,采用了混沌序列来产生初始种群,以降低系

基金项目: 山东省重点研发计划资助(2019GGX103049)

统网损、减少 DG 投资运行费用、降低电压偏移为多目标, 构造了优化配置模型。文献[15]构造了系统有功网损和购电成本最低的数学模型, 并将混沌搜索策略引入到猫群算法中。文献[16]对粒子群算法进行了改进, 用来确定 DG 的安装位置和容量, 通过和已有种群的均值比较来确定新的惯性权重值, 对速度进行自适应更新。以上文献从多个角度, 采用不同方法解决 DG 的优化配置问题。但在多目标优化问题上, 各个子目标之间通常是矛盾的, 很难同时实现最优, 最终规划方案为兼顾全部目标所得的规划结果^[17-21]。针对目前存在问题, 本文在进行全局优化之前, 对降低网损做了一定考虑, 根据预先规划好需要接入 DG 的数量, 先规划好 DG 的接入位置, 根据潮流计算所得的节点电压, 从配电网节点电压最低处接入, 后期迭代再更新其位置和容量。在算法改进当中, 也会对位置和容量的越限问题带有收缩处理, 使位置和容量都处于合理范围内。由于种群每个个体所对应的规划方案, 是从节点电压最低处开始接入, 在全局寻优的开始, 就已经降低了网损, 相比后期同时兼顾各个子目标优化处理, 更具优势。

本文构造的目标函数在考虑运营商利益的同时, 还考虑了用户购电成本。为了改善系统整体节点电压水平, 本文提出了一种新的系统电压增强指标, 然后将它加入到目标函数当中。由于经济指标和系统电压增强指标量纲不同, 需要进行无量纲化然后归一化处理, 根据层次分析法确定各个目标函数的权重, 得到综合目标函数。在此基础上, 针对 DG 的选址定容问题对乌燕鸥算法做出了相应的改进, 并将其应用到 DG 的规划问题上。

1 分布式电源的优化配置模型

首先建立 DG 的优化配置模型, 以有功网损、年投资运行费用、用户购电成本和系统电压增强指标来构造目标函数, 以功率平衡、电压、配电线路极限传输和 DG 装置容量为约束条件, 进而规划合适的优化配置方案。

1.1 目标函数

1) 网损费用

以系统的有功网损最低构造目标函数, 如式(1)所示。

$$P_L = \sum_{k=1}^{N_b} G_k (U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \delta_{ij}) \quad (1)$$

式中: P_L 为配电网的有功网损; N_b 为支路总数; G_k 为节点 i 和节点 j 之间支路的电导; U_i 、 U_j 分别为

节点 i 和节点 j 的电压幅值; δ_{ij} 为节点 i 和节点 j 的电压相角差。

将系统的有功网损转化成经济指标, 如式(2)所示。

$$f_1 = P_L T_{\max} C_{p.u.} \quad (2)$$

式中: T_{\max} 为最大年负荷利用小时数; $C_{p.u.}$ 为实时电价。

2) 分布式电源的投资成本

$$f_2 = \sum_{i=1}^{N_d} x_i \left[\left(\frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \cdot C_{D_i} + C_{r_i} \right) \right] P_{DG_i} \quad (3)$$

式中: x_i 为节点是否安装 DG; N_d 为安装 DG 的节点数目; r 为年回报率, 取值为 0.1; n 为规划年限; C_{D_i} 为节点 i 安装 DG 的投资成本; C_{r_i} 为 DG 运行成本; P_{DG_i} 为节点 i 安装 DG 的容量。

3) 用户购电成本

$$f_3 = (P_w - P_{\sum DG} - \Delta P_L) T_{\max} C_{p.u.} = \left[P_w - P_{\sum DG} - (P_{\text{loss}} - P'_{\text{loss}}) \right] T_{\max} C_{p.u.} \quad (4)$$

式中: P_w 为系统的总容量; $P_{\sum DG}$ 为分布式电源总的有功输出; T_{\max} 为年最大负荷利用小时数; $C_{p.u.}$ 为实时电价; P_{loss} 和 P'_{loss} 分别为优化前后的有功损耗。

4) 系统电压增强

DG 接入配电网以后, 对于 DG 所选的区域以及整个系统来说, 系统节点电压的分布都能够得到改善。为了衡量 DG 接入前后对配电网节点电压的提升水平, 评估在 DG 规划前后系统节点电压提高的比率, 以及测量系统整体电压改善情况, 应考虑系统的所有节点。本文提出了一种新的系统电压增强指标, 如式(5)一式(7)所示。

$$V_{SVEI} = \frac{SV_n^{wp}}{SV_n^{wop}} \quad (5)$$

$$SV_n^{wp} = \sum_{n \in \Omega_n} (V_n^{wp} - V_{\min}) \times (V_{\max} - V_n^{wp}) \quad (6)$$

$$SV_n^{wop} = \sum_{n \in \Omega_n} (V_n^{wop} - V_{\min}) \times (V_{\max} - V_n^{wop}) \quad (7)$$

式中: SV_n^{wp} 为 DG 接入以后电压的增强值; SV_n^{wop} 为 DG 接入以前的电压增强值; Ω_n 为系统节点集合; V_n^{wp} 为有规划 DG 接入以后节点 n 的电压值; V_n^{wop} 为无规划 DG 接入之前节点 n 的电压值; V_{\max} 、 V_{\min} 为系统节点电压的最大值、最小值。

$$V_{\text{ref}} = \frac{V_{\max} + V_{\min}}{2} \quad (8)$$

式中, V_{ref} 为系统节点电压参考值。

当系统中所有节点电压的幅值都接近 V_{ref} 时, 将会提高系统的电压稳定裕度。因此, 在规划 DG 接入以后, V_n^{vp} 越接近 V_{ref} 时的 SV_n^{vp} 越大, 即 V_{SVEI} 也越大, 系统的节点电压增强效果越好。

为了使系统电压增强指标更大, 以及方便多目标的归一化, 定义目标函数为

$$f_4 = \frac{1}{V_{\text{SVEI}}} \quad (9)$$

1.2 约束条件

1) 节点功率平衡约束

$$\begin{cases} P_i - \sum_{j=1}^N e_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) + f_i(G_{ij} + B_{ij}e_j) = 0 \\ Q_i - \sum_{j=1}^N f_i(G_{ij}e_j - B_{ij}f_j) - e_i(G_{ij}f_j + B_{ij}e_j) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中: P_i 、 Q_i 分别为流入节点 i 的有功和无功功率; N 为系统总的节点数目; e_i 和 f_i 分别为节点 i 电压的实部和虚部; G_{ij} 、 B_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的电导、电纳。

2) 节点电压约束

$$U_i^{\text{min}} \leq U_i \leq U_i^{\text{max}} \quad (11)$$

式中, U_i^{max} 、 U_i^{min} 分别为节点电压 i 的上下限值。

3) 线路的极限功率约束

$$P_{ij} < P_{ij,\text{max}} \quad (12)$$

式中, P_{ij} 为节点 i 到节点 j 的传输功率。

4) DG 接入容量约束

$$\sum P_{\text{DG}} \leq \eta \sum P_{\text{load}} \quad (13)$$

式中: η 为 0.25; P_{load} 为系统负荷总容量。

2 多目标函数权重系数确定

2.1 无量纲化

综合考虑网损费用、DG 投资成本、用户购电成本和系统电压增强指标这 4 个目标函数, 由于存在量纲不同的问题, 彼此之间还存在冲突, 难以使各个子目标同时获得最优。因此要对各个子目标进行无量纲化, 本文采用直线型无量纲法当中的极差标准法, 如式(14)所示。

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i \{x_{ij}\}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}} \quad (i=1, 2, \dots, m; j=1, 2, \dots, n) \quad (14)$$

式中: y_{ij} 为目标极差化以后的数据; x_{ij} 为评价策略 i 指标 j 的具体数值; $\max_i \{x_{ij}\}$ 和 $\min_i \{x_{ij}\}$ 分别为

x_{ij} 的最大值和最小值。

2.2 层次分析法

层次分析法(AHP)是由美国运筹学家 Saaty 提出的主观决策方法^[22-23]。AHP 使一个复杂的多目标决策问题分解为多指标的不同层次, 使用定性指标来模糊量化计算层次单排序以及总排序, 从而得出多目标的决策方案^[24-26]。

1) 构造判断矩阵

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

式中, a_{ij} 是指标 i 和指标 j 的相对重要程度, 矩阵当中各个要素的取值可以根据 Saaty 准则来确定。

2) 求特征值即特征向量

求取判断矩阵 A 的最大特征根 λ_{max} 及对应的特征向量 $\omega = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n\}$ 。求得的特征向量就是所需要的权重向量。

3) 一致性检验

$$C_1 = \frac{\lambda_{\text{max}} - n}{n - 1} \quad (16)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (17)$$

式中: C_1 为衡量不一致程度的一致性指标; R_1 为 Saaty 给定的随机一致性指标; 当 $C_R < 0.1$ 时, 表明该权重系数是可以选取的。

2.3 多目标归一化

各个子目标由式(14)无量纲化之后, 使用层次分析法对各个目标函数主观赋权, 然后确定子目标的权重, 因此把多个子目标函数统一为

$$f = \omega_1 f_1^* + \omega_2 f_2^* + \omega_3 f_3^* + \omega_4 f_4^* \quad (18)$$

式中: ω_i 为权重系数; f 为无量纲化以后的目标函数。

3 改进乌燕鸥算法

3.1 标准乌燕鸥算法

乌燕鸥算法(STOA)是 2019 年 G.dhiman 和 Kaur 提出的一种优化算法^[27-28]。STOA 算法通过模拟乌燕鸥觅食行为进行优化求解, 具有模型相对简洁、搜索能力强等特点, 拥有很好的全局搜索能力以及比较高的精度, 可以用来解决 DG 的优化配置问题, 该算法在迭代后期也存在收敛过早易早熟的缺点。基本寻优原理如下。

3.1.1 迁徙行为(全局搜索)

算法通过模拟乌燕鸥群体的迁徙过程来实现全局搜索, 在迁徙阶段需要满足 3 个条件。

1) 避免冲突

为了防止乌燕鸥群体之间出现碰撞, 算法采用附加变量 S_A 来计算乌燕鸥的新位置, 其公式为

$$C_{st} = S_A \times P_{st}(Z) \quad (19)$$

式中: C_{st} 为乌燕鸥不与其他乌燕鸥冲突的迁徙新位置; $P_{st}(Z)$ 为乌燕鸥当前所在位置; S_A 为乌燕鸥在给定空间的运动方式。

$$S_A = C_f - (Z \times (C_f / M_{iteration})) \quad (20)$$

式中: C_f 可以调整控制变量 S_A ; 它的值从 2 线性降低至 0; Z 为当前迭代次数; $M_{iteration}$ 为最大迭代次数。

2) 聚集

乌燕鸥个体在移动过程中避免与其他乌燕鸥位置发生冲突以后, 会向最佳位置所在的方向进行移动。其公式为

$$m_{st} = C_B \times (p_{bst}(Z) - p_{st}(Z)) \quad (21)$$

式中: m_{st} 为最佳位置所在方向; $p_{bst}(Z)$ 为乌燕鸥最佳位置; C_B 为使探索更加全面的随机数。

$$C_B = 0.5 \times R_{rand} \quad (22)$$

式中, R_{rand} 为 [0,1] 的随机数。

3) 更新

乌燕鸥向着最佳位置所在方向进行移动的轨迹, 其公式为

$$d_{st} = c_{st} + m_{st} \quad (23)$$

3.1.2 攻击行为(局部搜索)

乌燕鸥在迁徙过程中依靠翅膀和重量来保持高度, 并且可以不断调整攻击角度和速度。在要攻击猎物时, 乌燕鸥在空中的盘旋行为可被定义为如下数学模型。

$$x' = R \times \sin(i) \quad (24)$$

$$y' = R \times \cos(i) \quad (25)$$

$$z' = R \times i \quad (26)$$

$$R = u \times e^{kv} \quad (27)$$

式中: R 为每个螺旋的半径; i 为 [0, 2π] 的随机角度; u 和 v 是螺旋形状的相关常数。

乌燕鸥的攻击位置根据式(24)一式(27)可得:

$$P_s(Z) = (d_{st} \times (x' + y' + z')) \times P_{bst}(Z) \quad (28)$$

式中, $P_s(Z)$ 为乌燕鸥的攻击位置。

3.2 乌燕鸥算法的改进

本文根据建立的模型, 为了减少配电网的网损以及降低费用, 对传统乌燕鸥算法做出以下三点改进。

1) 种群个体位置优化

在初次迭代寻优之前, 根据前推回代潮流计算得到各个节点的电压, 首个 DG 接入最低电压节点处; 再进行潮流计算找到节点电压最低处, 接入第二个 DG, 直到达到预先规划好的 DG 数目, 以此得到初始种群。分布式电源接入最低电压节点处, 会提高该节点的电压, 和相邻节点电压差减小, 减少馈线潮流移动, 在一定程度减少网损, 降低能耗。

2) 最优解微调策略

借鉴遗传算法中的变异思想, 在乌燕鸥算法中引入变异环节。假如规划接入 DG 的数量为 n , 那么由位置和容量组成 $2 \times n$ 个维度; 每个乌燕鸥个体对应着一种规划方案, 也就是 $2 \times n$ 个维度。根据适应度值比较选出种群最优个体, 随机对该个体其中一个维度进行变异微调, 所得新个体保存下来, 形成新的种群。在变异微调过程中, 如果位置或者容量出现越限情况, 也会进行收缩处理。如果位置变量越上界进行减 2 处理, 如果位置变量越下界进行加 2 处理; 如果容量变量超过规定最大值, 乘以 0.9 处理, 直到收缩回合理范围内, 从而防止越界。最优解微调策略公式如式(29)一式(31)。

$$X_\gamma^i = X_\alpha^i \pm \text{ceil}(a \cdot b \cdot U^i + \varepsilon) \quad (29)$$

$$a = \text{rand}(0,1) \quad (30)$$

$$b = 1 - \frac{Z-1}{M_{iteration}} \quad (31)$$

式中: X_γ^i 为第 γ 个新生成个体的第 i 个维度; X_α^i 为最优个体 α 的第 i 个维度; $\text{ceil}()$ 为对括号内做向上取整运算; U^i 为在第 i 个维度下的上限值; ε 为机械极小值, 即大于 0 的一个极小数; a 为 (0,1) 的随机数。

3) 增强局部搜索能力

变量 S_A 在寻优过程中, 起着自适应惯性权重的作用, 权重较大时有很好的全局搜索能力, 可以加快收敛速度, 但难以得到最优解^[29]。为了增强局部搜索能力, 随着迭代次数增多适当降低权重数值, 对变量 S_A 进行改进, 如式(32)、式(33)所示。

$$S_A = [C_f - (Z \times (C_f / M_{iteration}))] / \omega \quad (32)$$

$$\omega = \begin{cases} 1 & Z \leq 0.25M_{iteration} \\ 2 & 0.25M_{iteration} < Z \leq 0.5M_{iteration} \\ 4 & 0.5M_{iteration} < Z \leq 0.75M_{iteration} \\ 8 & 0.75M_{iteration} < Z \leq M_{iteration} \end{cases} \quad (33)$$

3.3 算法流程

改进乌燕鸥算法解决 DG 的优化配置流程如图 1 所示。

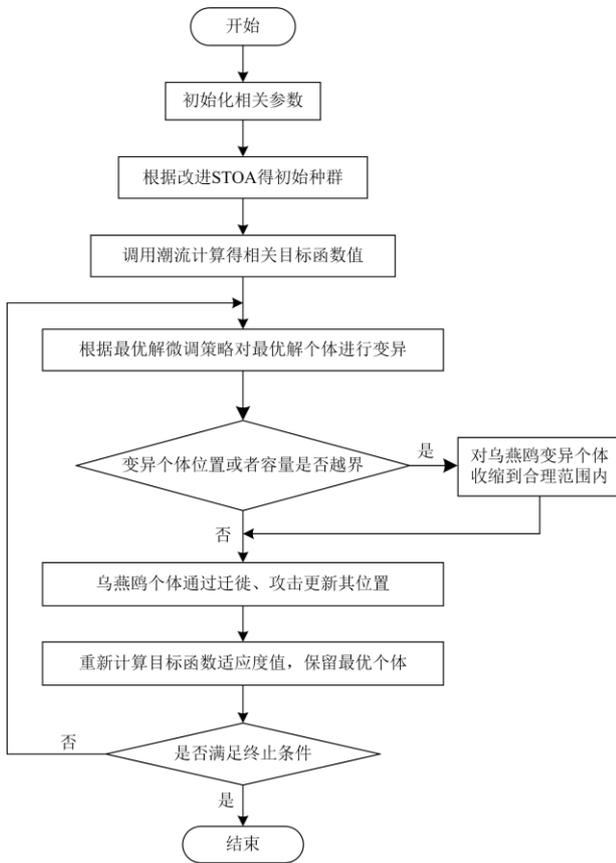


图 1 改进 STOA 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of improved STOA algorithm

4 算例分析

4.1 基本参数

本文以 IEEE33 节点配电系统为例, 如图 2 所示。系统的总负荷为 3 715 kW 和 2 300 kvar。本文在算例当中, 规划最多接入 5 个 DG, DG 可以接入的位置节点为 {2, 3, ..., 33}。令 $P_s = 10$ kW, 如果求出接入位置节点 X_i 为 0, 表明该节点不接入 DG, 如果 X_i 的数值不为 0, 表明该节点接入 DG 的容量为 $(X_i \times 10)$ kW。其中: X_i 的取值为 $[0, M]$ 的实数; M 为 $DG(\text{Max}(i))/P_s$; 年最大负荷利用小时数 $T_{\max} = 3\ 200$ h; 单位电价 $C = 0.5$ 元/kWh; DG 的单位安装费用为 $C_{D,i} = 1500$ 元/kW; 运行维护成本为 $C_{r,i} = 500$ 元/kW; 系统年运行时间为 8 760 h, 规划年限为 20 年; DG 当作负的 PQ 节点处理, 功率因数为 0.9。

算法的参数设置为: 种群数量为 200; 最大迭代次数 $M_{\text{iteration}} = 250$; 控制变量 $C_f = 2$; 随机变量 C_B 为 $[0, 0.5]$ 的随机数; 螺旋常数 u, v 为 1。

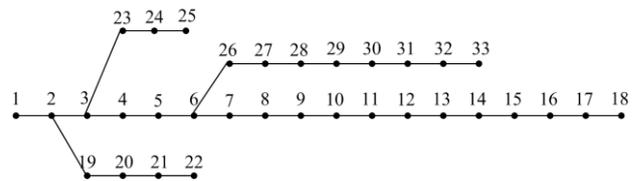


图 2 IEEE33 节点配电系统

Fig. 2 IEEE33 node power distribution system

采用层次分析法确定各个目标函数的权重, 本文根据计算结果所取的权重分别为: $\omega_1 = 0.292\ 8$, $\omega_2 = 0.235\ 1$, $\omega_3 = 0.225\ 9$, $\omega_4 = 0.246\ 2$ 。由结果分析可知, 网损费用所占权重最大, 系统电压增强指标、年投资成本和购电费用所占权重次之。

4.2 仿真算例分析

根据上述参数仿真, 对归一化之后的目标函数进行最小值寻优。采用改进自适应遗传算法^[7]、乌燕鸥算法和改进乌燕鸥算法进行对比, 结果如表 1 所示。

表 1 不同算法结果对比

Table 1 Comparison of results of different algorithms

算法	DG(位置和容量)	网损/kW	投资成本/万元	购电成本/万元	系统电压增强指标
未接 DG	—	211.92	—	594.40	1
改进 GA	10(30) 14(10) 16(480) 17(10) 18(10) 32(260) 3(80) 6(50)	103.97	55.45	445.93	1.56
STOA	14(190) 17(270) 33(270)	108.83	54.09	449.91	1.55
改进 STOA	14(110) 15(100) 17(210) 31(170) 32(250)	96.22	56.80	441.49	1.58

由表 1 可以看出: 采用改进的 STOA 算法, DG 接入以后, 网损从原本的 211.92 kW 降低到 96.22 kW, 优化以后有功网损减少了 54.60%, 网损费用明显降低。而应用改进 GA 算法和 STOA 算法系统网损分别降低了 50.94% 和 48.65%, 均小于改进 STOA 算法的优化结果。DG 接入配电网以后, 有效地减少了用户的购电成本。从系统电压增强指标来看, 改进 STOA 算法的系统电压增强指标最好, 改进 GA 算法增强效果次之, STOA 算法的增强效果最差。

图 3 为在接入 DG 前后采用不同算法选址定容结果之后各个节点的电压标幺值, 从图中可以看出, 节点电压的最低值都得到了提高。本文改进的 STOA 算法优化之后, 节点的最低电压为 0.940 7 p.u., 配

电网的各个节点电压普遍有了明显改善, 平均电压为 0.962 5 p.u.。改进 STOA 算法对系统节点电压的提升水平一直处于改进 GA 算法和 STOA 算法之间。在前 19 个节点之前, 改进 GA 算法提升电压水平最好, 但是在第 19 个节点之后, 改进 GA 算法提升电压的水平最差; STOA 算法和改进 GA 算法恰好相反, 而改进 STOA 算法提升的节点电压程度一直处于这两个算法之间, 但是整体提升电压水平改进 STOA 算法是最好的。综上, 从表 1 的系统电压增强指标数值比较以及图 3 不同算法的直观来看, 改进 STOA 算法对系统电压改善程度最好。

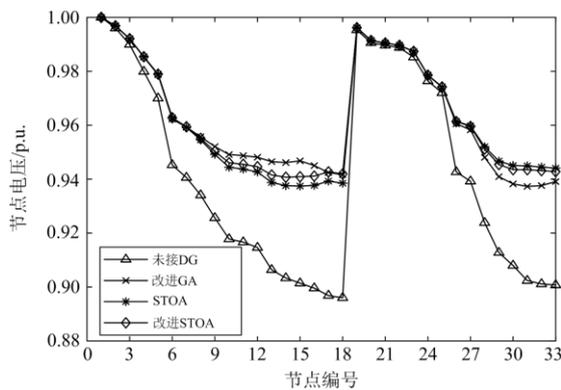


图 3 IEEE33 各节点的电压幅值

Fig. 3 Voltage amplitude of IEEE33 nodes

为了证明改进 STOA 算法的优化效果, 利用本文改进的乌燕鸥算法和标准乌燕鸥算法以及改进自适应遗传算法^[7]在同一网络下进行优化, 结果如图 4 和表 2 所示。

由图 4 可以看出: 第一次迭代的结果中三种算法的网损值是不同的, 改进 STOA 算法的网损值最小, 说明算法第一个改进种群个体位置优化是有效的, 分布式电源从配电网最低电压节点处开始接入,

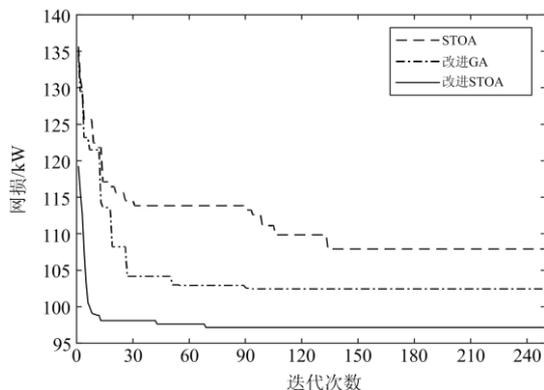


图 4 不同算法网损对比

Fig. 4 Comparison of network loss of different algorithms

表 2 不同算法优化结果对比

Table 2 Comparison of optimization results of different algorithms

算法	最小网损/kW	平均迭代次数	平均时间/s
改进 GA	103.97	87	19.1
STOA	108.83	135	26.7
本文算法	96.22	64	16.2

能提高被接入点的电压, 减缓馈线上的潮流移动, 在一定程度上减少网损。由于是从最初的结果就优于其他算法, 在接下来的最优解微调策略过程中, 收敛速度会更快。

由表 2 可以看出: 3 种智能算法在迭代精度方面相近, 但是本文改进的乌燕鸥算法寻优精度更好。在寻优效率方面, 本文算法平均迭代次数为 64 次, 而其他两种算法的收敛次数为 87 次和 135 次, 相比较而言, 本文所改进算法的迭代次数最少。上述 3 种算法在各运行 100 次以后, 本文算法的寻优效率最高, 平均耗时最少, 寻优精度和效率上更为优越。

5 结论

1) 本文以网损费用、DG 年投资成本、购电成本、系统电压增强指标等 4 个指标建立模型, 归一化后使用层次分析法确定了各个目标的权重, 转化成了单目标问题进行求解。通过算例仿真表明, 构造的 DG 优化配置模型能有效降低系统网损, 减少 DG 年投资成本, 降低用户购电费用, 同时改善系统整体电压分布, 对 DG 接入配电网具有积极作用。

2) 提出改进乌燕鸥算法, 针对选址定容问题进行了相应的改进, 初次迭代寻优的结果优于其他算法。融入了遗传算法的变异环节, 提出了最优解微调策略, 加快了算法收敛速度, 通过算例仿真, 验证了本文改进的乌燕鸥算法具有很好的适应性。

参考文献

- [1] 阎鼎, 包海龙, 程浩忠, 等. 配电网中分布式电源最大准入容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2015, 27(10): 16-20.
YAN Ding, BAO Hailong, CHENG Haozhong, et al. Optimal configuration of the maximum access capacity of distributed power sources in distribution networks[J]. Proceeding of the CSU-EPSSA, 2015, 27(10): 16-20.
- [2] 王艺, 王宾, 刘阳, 等. 计及分布式电源动态行为的配电网重构优化策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 164-172.
WANG Yi, WANG Bin, LIU Yang, et al. Optimization

- strategy of distribution network reconfiguration taking into account the dynamic behavior of distributed power sources[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 164-172.
- [3] 郑晓莹, 陈政轩, 曾琮. 含分布式电源的配电网双层分区调压策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 90-97.
ZHENG Xiaoying, CHEN Zhengxuan, ZENG Cong. Voltage regulation strategy of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 90-97.
- [4] 叶德意, 何正友, 臧天磊. 基于自适应变异粒子群算法的分布式电源选址与容量确定[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 155-160.
YE Deyi, HE Zhengyou, ZANG Tianlei. Location and capacity determination of distributed generation based on adaptive mutation particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 155-160.
- [5] 张勇军, 张锶恒, 刘斯亮, 等. 考虑分布式光伏与储能接入的配变双层规划[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(24): 9-15.
ZHANG Yongjun, ZHANG Siheng, LIU Siliang, et al. Distribution transformer bi-level planning considering distributed photovoltaic and energy storage integration[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(24): 9-15.
- [6] 潘超, 孟涛, 蔡国伟, 等. 广义电源多目标优化配置与运行[J]. 电网技术, 2015, 39(12): 3505-3512.
PAN Chao, MENG Tao, CAI Guowei, et al. Multi-objective optimization configuration and operation of generalized power sources[J]. Power System Technology, 2015, 39(12): 3505-3512.
- [7] 张帆, 杨翮, 商佳宜, 等. 考虑负荷损失最小的配网孤岛划分策略研究[J]. 高压电器, 2021, 57(4): 181-188.
ZHANG Fan, YANG Xuan, SHANG Jiayi, et al. Study on island partition strategy of distribution network considering minimum load loss[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(4): 181-188.
- [8] 段建东, 孙茜, 陈鲁鹏, 等. 基于改进和声搜索算法的有源配电网优化调度[J]. 高压电器, 2021, 57(11): 1-9.
DUAN Jiandong, SUN Qian, CHEN Lupeng, et al. Optimal dispatching of active distribution network based on improved harmony search algorithms[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(11): 1-9.
- [9] 刘晋源, 吕林, 高红均, 等. 计及分布式电源和电动汽车特性的主动配电网规划[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 41-48.
LIU Jinyuan, LÜ Lin, GAO Hongjun, et al. Planning of active distribution network considering characteristics of distributed generator and electric vehicle[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 41-48.
- [10] 贾兆昊, 张峰, 丁磊. 考虑功率四象限输出的配电网储能优化配置策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 105-113.
JIA Zhaohao, ZHANG Feng, DING Lei. Optimal allocation strategy of energy storage in distribution network considering power four-quadrant output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 105-113.
- [11] 程维杰, 颜云松, 康明才, 等. 考虑分布式电源影响的配电网源荷储分层协调控制[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 113-119.
CHENG Weijie, YAN Yunsong, KANG Mingcai, et al. Generation-load-storage layered coordinated control of distribution network considering the influence of distributed generation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 113-119.
- [12] 郭清元, 莫超, 吴杰康, 等. 分布式电源接入的配电系统多类型无功源出力优化方法[J]. 电力工程技术, 2020, 39(5): 211-219.
GUO Qingyuan, MO Chao, WU Jiekang, et al. Multi-type reactive power output optimization method of distribution system with distributed generations[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(5): 211-219.
- [13] 王振浩, 李文文, 陈继开, 等. 基于改进自适应遗传算法的分布式电源优化配置[J]. 电测与仪表, 2015, 52(5): 30-34.
WANG Zhenhao, LI Wenwen, CHEN Jikai, et al. Optimal configuration of distributed power sources based on improved adaptive genetic algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(5): 30-34.
- [14] 张涛, 张东方, 王凌云. 基于灰狼算法的分布式电源优化配置[J]. 水电能源科学, 2018, 36(4): 204-207, 212.
ZHANG Tao, ZHANG Dongfang, WANG Lingyun. Optimal allocation of distributed generation based on Gray Wolf algorithm[J]. Water Resources and Power, 2018, 36(4): 204-207, 212.
- [15] 杨磊, 杨晓辉, 吴越, 等. 基于改进猫群算法的分布式电源优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(1): 95-100.
YANG Lei, YANG Xiaohui, WU Yue, et al. Optimal configuration of distributed power sources based on improved cat swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(1): 95-100.
- [16] 蒙璟, 李训聿, 丁霞燕. 基于改进自适应权重多目标

- 粒子群算法的分布式电源优化配置[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 55-60, 106.
- MENG Jing, LI Xunyu, DING Xiayan. Optimal allocation of distributed generation based on improved adaptive weight multi-objective particle swarm optimization[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 55-60, 106.
- [17] 任智君. 主动配电网分布式电源优化配置技术研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- REN Zhijun. Research on optimal configuration technology of distributed generation in active distribution network[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.
- [18] PRATAP C N, RAMESH C, RA P, et al. Grasshopper optimization algorithm optimized multistage controller for automatic generation control of a power system with FACTS devices[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 109-123.
- [19] 陈海焱, 段献忠, 陈金富. 分布式发电对配网静态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(19): 27-30.
- CHEN Haiyan, DUAN Xianzhong, CHEN Jinfu. Influence of distributed generation on static voltage stability of distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(19): 27-30.
- [20] 武晓朦, 刘健, 毕鹏翔. 配电网电压稳定性研究[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 31-35.
- WU Xiaomeng, LIU Jian, BI Pengxiang. Research on voltage stability of distribution network[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 31-35.
- [21] 徐泽, 杨伟, 张文强, 等. 基于连锁环网与改进离散粒子群算法的多目标配电网重构[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(6): 114-123.
- XU Ze, YANG Wei, ZHANG Wenqiang, et al. Multi-objective distribution network reconfiguration based on chain ring network and improved discrete particle swarm algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(6): 114-123.
- [22] CHEN Wei, BU Xiaona. Research on brand value based on analytic hierarchy process and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 194(1).
- [23] BAKHTARI A R, WARIS M M, SANIN C, et al. Evaluating industry 4.0 implementation challenges using interpretive structural modeling and fuzzy analytic hierarchy process[J]. Cybernetics and Systems, 2021, 52(5).
- [24] 王香香, 慕腾. 基于和声搜索算法的分散式风场无功优化方法研究[J]. 山东电力技术, 2021, 48(4): 14-18.
- WANG Xiangxiang, MU Teng. Research on reactive power optimization method of distributed wind farm based on harmony search algorithm[J]. Shandong Electric Power Technology, 2021, 48(4): 14-18.
- [25] 王长江, 李本新, 姜涛, 等. 基于改进模糊层次分析法的交直流受端电网交流故障筛选与排序[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 4047-4056.
- WANG Changjiang, LI Benxin, JIANG Tao, et al. Screening and sequencing of AC faults in AC and DC receiving-end power grids based on improved fuzzy analytic hierarchy process[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 4047-4056.
- [26] 刘志鹏, 韦庆益, 吴蕾蕾, 等. 基于层次分析和逼近理想解排序法的新胭脂红色素 SERS 快检方法评价[J]. 现代食品科技, 2021, 37(7): 302-309, 30.
- LIU Zhipeng, WEI Qingyi, WU Leilei, et al. Evaluation of new carmine pigment SERS quick inspection method based on analytic hierarchy process and approaching ideal solution sorting method[J]. Modern Food Science and Technology, 2021, 37(7): 302-309, 30.
- [27] 贾鹤鸣, 李瑶, 孙康健. 基于遗传乌燕鸥算法的同步优化特征选择[J/OL]. 自动化学报: 1-18[2021-03-30]. DOI: 10.16383/j.aas.c200322.
- JIA Heming, LI Yao, SUN Kangjian. Feature selection for synchronous optimization based on genetic algorithm [J/OL]. Acta Automatica Sinica: 1-18[2021-03-30]. DOI: 10.16383/j.aas.c200322.
- [28] DHIMAN G, KAUR A. STOA: A bio-inspired based optimization algorithm for industrial engineering problems[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence, 2019, 82: 148-174.
- [29] 闫天泽, 邱晓燕, 刘延博, 等. 基于引入模拟退火思想的改进粒子群算法的电动汽车充电站最优规划[J]. 电测与仪表, 2017, 54(6): 11-16.
- YAN Tianze, QIU Xiaoyan, LIU Yanbo, et al. Optimal planning of electric vehicle charging stations based on improved particle swarm optimization with the introduction of simulated annealing ideas[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(6): 11-16.

收稿日期: 2021-04-10; 修回日期: 2021-07-06

作者简介:

肖永江(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: 1785897859@qq.com

于永进(1980—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: yaydjt@163.com

张桂林(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为滞环非线性建模与控制. E-mail: zhangguilin@sdust.edu.cn

(编辑 葛艳娜)