

基于改进天牛须搜索算法的分布式电源选址定容

卢光辉¹, 滕欢¹, 廖寒逊¹, 吴泽穹²

(1. 四川大学 智能电网四川省重点实验室, 成都 610065;

2. 国网四川省电力公司信息通信公司, 成都 610041)

摘要:针对分布式电源接入配电网的选址定容问题,在考虑到网损、静态电压稳定和线路热稳定3个指标的基础上,采用层次分析法建立了分布式电源在配电网中选址定容的多目标优化模型。引入模拟退火算法中的蒙特卡洛法则对一种新的智能优化算法-天牛须搜索算法(Beetle Antennae Search, BAS)进行改进,提高算法的稳定性,并应用于分布式电源选址定容问题求解。算例仿真实验验证了改进天牛须搜索算法(Improved Antennae Search, IBAS)在分布式电源选址定容问题求解中的高效性和稳定性。

关键词:分布式电源;配电网;选址定容;改进天牛须搜索算法

DOI:10.19753/j.issn1001-1390.2019.017.002

中图分类号:TM933

文献标识码:A

文章编号:1001-1390(2019)17-0006-07

Location and sizing of distributed generation planning based on the improved beetle antennae search algorithm

Lu Guanghui¹, Teng Huan¹, Liao Hanxun¹, Wu Zeqiong²

(1. Intelligent Electric Power Grid Key Laboratory of Sichuan Province, Sichuan University, Chengdu 610065, China.

2. Information and Communication Branch of State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, China)

Abstract: In order to study the location and sizing of distributed generation on the distribution network, on basis of comprehensively considering three indices of network loss, the static voltage stability and line thermal stability, this paper establishes a multi-objective linear programming model based on analytic hierarchy process (AHP). A new intelligent optimization algorithm of beetle antennae search-BAS is improved by introducing Monte Carlo law from simulated annealing algorithm to solve the problem of location and sizing of distributed generation. The feasibility and effectiveness of the improved antennae search-IBAS in the solution of location and sizing problems of the distributed generation are verified by the simulation.

Keywords: distributed generations, distribution network, location and sizing, improved antennae search algorithm

0 引言

近年来,随着经济的快速发展,能源需求急剧增加,在资源和环境压力不断增大以及国民环保意识不断增强的背景下,以前的集中式单一供电方式所带来的稳定性、环保性以及经济性等问题引起人们的重视。随着可再生能源发电技术的成熟,小容量环保的分布式电源(Distributed Generator, DG)也开始大量接入配电网, DG 具有安装灵活、污染小、经济性高等优点,合理选择 DG 的安装地点和容量可以降低电网网损、提高电压质量、调节电网潮流、提高电网的稳定性。为了合理配置 DG,充分发挥 DG

对电网的积极作用,很多学者对分布式电源选址定容问题开展了深入研究。

目前很多学者从不同角度对 DG 选址定容优化问题进行了研究。DG 接入配电网选址定容的求解算法大致可分为经典数学规划算法和现代智能优化算法。经典数学规划算法^[1-3]在面临较为复杂规模的求解问题时,收敛性常会出现问题,而智能算法面对复杂的非线性非连续规划问题时具有全局寻优能力强、鲁棒性高等优点,非常适合于电力系统规划设计。文献[4]在目标函数中考虑到环境影响,采用改进的遗传算法对分布式电源的位置和容量进行优化;文献

[5]在 DG 类型、位置和容量都不确定的情况下,以投资成本最少、收益最高、环境效益最高和配电网网损最小为目标函数,采用基于区间 TOPSIS 与遗传算法结合的方法对模型进行优化求解;文献[6]针对网损、电压质量和电流质量 3 个指标,建立了 DG 选址定容多目标优化模型,并采用改进多目标微分进化算法进行优化分析;文献[7]分析了 DG 接入配电网对系统网损的影响,并提出采用混合模拟退火算法改进的粒子群算法,以网损最小为目标函数进行优化分析;文献[8]将改进粒子群算法与罚函数结合,将 DG 选址定容规划问题转化成无约束求极值问题。遗传算法、粒子群算法的算法较复杂,求解计算缓慢,于是文章将具有寻优速度快优点的天牛须算法应用于 DG 的选址定容问题求解。

天牛须搜索算法^[9-10]是一种模仿天牛寻找食物来进行全局寻优的智能优化算法,它的算法运算量低、寻优速度快,但是稳定性较差,文中将模拟退火的蒙特卡洛准则^[11]引入该算法对其进行改进,使改进天牛须算法(IBAS)具有良好的可重复性和稳定性。以系统网损最低、系统节点静态电压稳定指标最小和线路热稳定电流最小建立 DG 选址定容模型,将改进天牛须算法应用到 DG 选址定容问题的求解,在 MATLAB 环境下对多个 DG 接入 IEEE-33 节点配电网系统的选址定容进行仿真分析,并与 PSO 进行对比,验证了该方法的正确性和有效性。

1 含 DG 的配电网优化配置模型

1.1 目标函数与约束条件

提出以有功网损、静态电压稳定指标以及线路热稳定裕度为目标函数的多目标优化,根据层次分析法将多目标进行归一化为单目标,运用 IBAS 进行 DG 的选址定容优化。

1.1.1 网络损耗

DG 接入配电网可以减少节点相邻支路的潮流流动,减小网络损耗。但是如果接入 DG 容量过大,会导致配电网出现反向潮流,亦可能增加网络损耗。合理配置 DG,可以有效降低网络损耗,提高发电利用率,节约能源。选接入 DG 后网损最小为优化目标函数,表达式为:

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^N I_i^2 R_i \quad (1)$$

式中 N 表示配电网支路总数; I_i 表示支路 i 的电流; R_i 表示支路 i 的电阻值。

1.1.2 静态电压稳定指标

图 1 中, $R_{m,n} + jX_{m,n}$ 表示节点 m 与节点 n 之间在线

路阻抗; $\dot{I}_{m,n}$ 表示线路上流过的电流; U_m 、 U_n 分别为节点 m 和节点 n 的电压; $P_m + jQ_n$ 是节点 n 的注入功率。

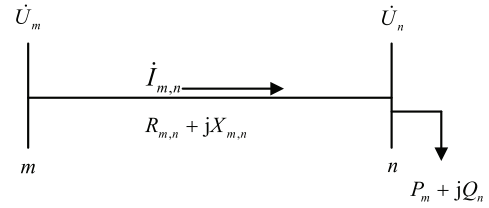


图 1 简单配电网典型支路

Fig. 1 Typical branch of simple distribution network

当电力系统遭受干扰后的一段时间内,网络中的母线电压不稳定,功率不能正常传送给用户,更严重后果是系统电压崩溃。这里用静态电压稳定度指标^[12]来表示系统电压稳定性。

$$S_i = \frac{4(P_n R_{m,n} + Q_n X_{m,n})U_m^2 + 4(P_n X_{m,n} - Q_n R_{m,n})}{U_m^4} \quad (2)$$

式中 S_i 表示支路 i 的静态电压稳定度, S_i 越大,对电压崩溃越敏感,稳定性越差。定义 S 为配电网静态电压稳定指标最大值,表示为:

$$S = \max_{i=1}^N (S_i) \quad (3)$$

取其静态电压稳定指标最小为目标函数,提高配电网系统电压稳定性。即:

$$f_2 = \min S \quad (4)$$

1.1.3 线路电流指标

考虑配电网各支路上线路电流水平对电网安全稳定运行的影响,采用线路热稳定裕度指标,即系统中所有线路的最大载流量^[6]。定义 $I_{\max}$ 为系统支路电流最大值,即线路热稳定电流,表示为:

$$I_{\max} = \max_{i=1}^N (I_i) \quad (5)$$

取线路热稳定电流最小为目标函数,提高系统线路热稳定性。即:

$$f_3 = \min(I_{\max}) \quad (6)$$

1.2 约束条件

主要包括等式约束和不等式约束:

(1) 等式约束。

$$\begin{cases} P_s + \sum_{i=1}^N P_{DG_i} = P_{\text{load}} + P_{\text{loss}} \\ Q_s + \sum_{i=1}^N Q_{DG_i} = Q_{\text{load}} + Q_{\text{loss}} \end{cases} \quad (7)$$

式(7)为功率平衡约束, P_s 、 Q_s 表示电网提供功率; P_{DG_i} 、 Q_{DG_i} 表示安装的分布式电源向配电网提供的功率; P_{load} 、 Q_{load} 表示配电网负荷功率; P_{loss} 表示配电

网有功网损; Q_{loss} 为无功损耗。

(2) 不等式约束。

$$\begin{cases} V_{\min} \leq V_i \leq V_{\max} \\ I_i \leq I_{\max} \\ S_i \leq S_{\max} \\ S_{\text{DG}} \leq S_{\text{DGmax}} \end{cases} \quad (8)$$

不等式约束包括电压约束、支路电流约束、线路输送功率约束以及分布式电源安装总容量约束。

1.3 无量纲化

综合考虑网络损耗、静态电压稳定性和线路热稳定这三个优化目标函数,由于各个分目标函数具有不同的量纲,而且互相存在冲突,各目标无法同时取得最优。采用直线型无量纲化方法中的极差标准化法对各目标进行无量纲处理,具体为:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min_i \{x_{ij}\}}{\max_i \{x_{ij}\} - \min_i \{x_{ij}\}} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中 x_{ij} 表示评价策略 i 指标 j 的具体数值; $\max_i \{x_{ij}\}$ 和 $\min_i \{x_{ij}\}$ 分别表示 x_{ij} 的最大值和最小值; y_{ij} 为目标极差化后的数据, $y_{ij} \in [0, 1]$ 。

1.4 层次分析法

层次分析法^[13] (Analytic Hierarchy Process, AHP) 是由美国运筹学家 Saaty 提出的主观决策方法。AHP 将一个复杂的多目标决策问题分解为多指标的若干层次,由定性指标模糊量化计算层次单排序与总排序,得出多目标决策方案。

(1) 构造判断矩阵。

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中 a_{ij} 为指标 i 与指标 j 之间相对重要程度,判断矩阵中元素具体取值可通过 saaty 标准来进行确定。

(2) 求解特征值即特征向量。

求取判断矩阵 A 最大特征根 $\lambda_{\max}$ 及对应特征向量 $w = \{w_1, w_2, \dots, w_n\}$ 。所得特征向量即为所需的权重向量。

(3) 一致性检验。

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (11)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (12)$$

式中 C_1 为判断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,则认为该权重系数是可取的。

1.5 多目标归一化

分目标经过式(9)无量纲化处理后,采用层次分析法对多目标进行主观赋权,确定各分目标的权重,统一目标函数。

$$f = w_1 f_1^* + w_2 f_2^* + w_3 f_3^* \quad (13)$$

式中 w_i 为权重系数; f_i^* 为无量纲化后的目标函数。

2 改进 BAS 优化算法

天牛须搜索^[9-10,14] (Beetle Antennae Search, BAS), 也叫甲壳虫须搜索,是 2017 年提出的一种高效的智能优化算法。它是基于天牛觅食原理而开发的算法,其生物原理为:当天牛觅食时并不知道食物具体位置,只能根据天牛两只触角接受到的食物气味的强度而确定天牛的飞行方向,即左须触角接受到的气味大于右须,下一步天牛就会向左飞,相反则向右,直至找寻到食物。这里天牛寻找到食物的过程即全局函数寻优。与遗传算法、粒子群算法、模拟退火等智能算法类似,BAS 不需要知道函数的具体形式,不需要梯度信息,就可以实现高效寻优。与粒子群算法相比较,BAS 的优点是只需要一个个体,即一只天牛,这使算法运算量大大降低,加快了寻优速度。

2.1 BAS 模型建立

(1) 随机方向向量。

为了模拟天牛的搜索行为,定义它的方向向量为:

$$\vec{b} = \frac{\text{rand}(k, 1)}{\|\text{rand}(k, 1)\|} \quad (14)$$

式中 $\text{rand}(\cdot)$ 为随机函数; k 为空间维数。

(2) 天牛左右须空间坐标。

$$\begin{cases} x_r = x^t + d^t \vec{b} \\ x_l = x^t - d^t \vec{b} \end{cases}, \quad (t = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (15)$$

式中 t 为迭代次数; x_r, x_l 分别表示天牛右须和左须在第 t 次迭代时的空间位置; d 表示天牛左右须之间的距离。

(3) 适应度值。

$$\begin{cases} \text{fright} = f(x_r) \\ \text{fleft} = f(x_l) \end{cases} \quad (16)$$

式中 fright 、 fleft 分别表示天牛右须和左须在当前空间位置时的适应度值; $f(\cdot)$ 为适应度函数。

(4) 步长因子。

$$\delta' = c_1 \delta'^{-1} + \delta^0, d' = \delta' / c_2 \quad (17)$$

步长因子 δ 表示天牛的搜索步长, 初始步长 δ^0 一般设为较大值, 使其足以覆盖当前搜索区域, 式中 δ' 为算法在第 t 次迭代时的步长因子; c_1 、 c_2 两个参数由使用者设定。

(5) 预更新位置。

$$x' = x^{t-1} + \delta' b * \text{sign}(\text{fright} - \text{left}) \quad (18)$$

根据迭代更新天牛的位置, 式中 $\text{sign}()$ 为符号函数; δ' 为算法在第 t 次迭代时的步长因子。

(6) 接受解的判断规则。

BAS 在迭代过程中, 判断更新位置处适应度值与上一次位置适应度值的大小来确定是否接受预更新位置。

2.2 改进 BAS

BAS 算法具有寻优速度快、收敛快的优点, 其中步长的选择对算法的收敛性能和搜索效率影响很大, 极易在迭代过程中陷入局部最优, 不能找到全局最优值。为了让算法跳出局部最优, 引入模拟退火算法 (Simulate Anneal, SA) 的蒙特卡洛准则对 BAS 进行改进, 使得算法的重复性稳定性得到了很大提高, 并将改进后的算法应用于配网分布式电源选址定容。

SA 是一种基于蒙特卡洛思想设计的求解最优化问题的方法。通过模拟物体退火过程, 寻找到目标的最低能量, 即目标的最优值。模拟退火在搜索过程中引入随机因素, 即以一定的概率接受一个比当前解较差的解, 增加跳出局部最优的概率。

将 SA 算法中的蒙特卡洛准则引入到 BAS 中, 在迭代过程中, 以概率 p 接受较差解, 以提高 BAS 全局寻优能力。

$$p = \begin{cases} 1 & , f(x') < f(x^{t-1}) \\ \exp\left(-\frac{f(x') - f(x^{t-1})}{T}\right) & , f(x') \geq f(x^{t-1}) \end{cases} \quad (19)$$

式中 $f(x')$ 表示预更新位置处天牛嗅到的气味浓度; $f(x^{t-1})$ 表示上一次最佳位置嗅到的最强气味浓度; $\exp$ 表示自然指数; T 为较高温度, 随着算法迭代不断降低。这条公式表明: 随着算法的迭代, 接受较差解的概率 p 会相应降低。

3 分布式电源选址定容优化

3.1 变量编码策略

分布式电源选址定容的编码形式设计为:

$$x = [u_1, u_2, \dots, u_N, v_1, v_2, \dots, v_N] \quad (20)$$

式中 N 为配电网安装 DG 的数量; u_i 代表 DG 在配电网上的安装位置, 在算法迭代过程中, 整数编号会变成浮点型数, 将 u_i 按向上取整, 即取 $\text{ceil}(u_i)$; v_i 表示对应 u_i 节点处 DG 的安装容量。

3.2 算法求解步骤

(1) 输入配电网结构参数到数据库, 包括节点信息、支路阻抗、负荷数据; 初始化 IBAS 算法参数, 包括步长因子参数 c_1 、 c_2 和初始温度 T 、降温速率 k 、降温次数 c_3 、以及算法迭代最大次数 gen ;

(2) 设定迭代次数 $t = 0$, 初始化随机天牛位置 x^0 , 并设最优位置 $x_{\text{best}} = x^0$; 并根据式 (15) 计算天牛左须、右须位置。调用数据库中配电网初始结构参数并根据天牛位置重新建立结构参数, 采用前推回代法^[15]进行潮流计算, 然后计算适应度值 $f(x^0)$, $f_{\text{best}} = f(x_{\text{best}})$;

(3) 更新计数器 $t = t + 1$, 重新计算天牛左须、右须位置。并进行潮流计算和适应度值计算, 得到 $f(x_r)$ 、 $f(x_l)$;

(4) 根据式 (18) 计算预更新位置 x' , 调用潮流计算程序并计算适应度值 $f(x')$;

(5) 根据接受概率 p , 即式 (19) 来判断是否更新天牛的位置。若 $f(x') < f_{\text{best}}$, 接受概率 $p = 1$, 则 $x_{\text{best}} = x'$, $f_{\text{best}} = f(x')$; 若 $f(x') \geq f_{\text{best}}$, 则取 $\text{rand} < p$ 时, 更新天牛位置, 即 $x_{\text{best}} = x'$, $f_{\text{best}} = f(x')$, 否则不更新;

(6) 判断迭代次数 t 是否已达到初始化时设置的数值。是则进行下一步, 否则返回至步骤 (3);

(7) 输出最优解, 即最后一次迭代后的 x_{best} 与 f_{best} 。

4 算例仿真与分析

4.1 参数设置

利用上述模型以及改进的 BAS 算法, 在 MATLAB 环境下对 IEEE-33 节点配电网系统^[16]进行仿真。33 节点系统接线图如图 2 所示, 该系统总负荷为 3 715 kW 和 2 300 kvar。文中算例在 33 节点配电系统中安装 3 个 DG, DG 可接入节点为 $\{1, 2, \dots, 32\}$, 每个 DG 可以向配电网提供 0.2 MW ~ 1 MW 的功率, 安装总容量不超过 2 MW, 且 DG 的功率因数为 0.9。在前推回代法中潮流收敛的精度为 $\varepsilon = 10^{-6}$ 。

为了提高系统电压稳定性和线路热稳定性, 设定节点电压值波动不超过 5%, 最大线路电流不超过 300 A。

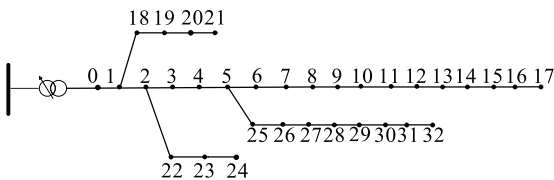


图 2 33 节点配电网测试系统接线图
Fig. 2 Wiring diagram of 33-bus radial distribution network test system

分别采用粒子群、天牛须和改进天牛须算法对算例进行仿真。天牛须算法的参数设置:最大迭代次数 $gen = 4\,000$; 步长因子 $c_1 = 0.997$, $c_2 = 10$; 改进天牛须算法的参数设置为:初始温度 $T = 10\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$; 降温速率 $k = 0.7$, 降温次数设置为 20 次, 最大迭代次数 $gen = 200$, 则等效迭代次数 $gen' = 20 \times 200 = 4\,000$ 次; 步长因子 $c_1 = 0.95$, $c_2 = 10$ 。

如图 3 所示, IBAS、BAS 和 PSO 算法对比, 由于 PSO 算法的复杂度远高于 IBAS 和 BAS, 相同迭代次数下, PSO 计算时间较长。为了突出 BAS 算法速度快的特点, 取粒子群算法的迭代次数为 1 000 次, 粒子数为 20, 权重因子 $c_1 = c_2 = 1.494\,45$, 惯性权重 $w = 1$ 。

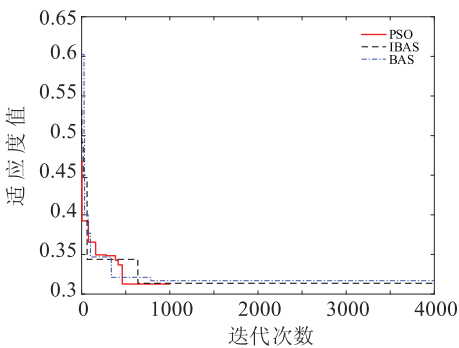


图 3 33 节点配电网测试系统 PSO、BAS 及 IBAS 优化的收敛曲线

Fig. 3 Comparison of convergency curve among PSO BAS and IBAS for 33-bus distribution test system

采取层次分析法确定目标函数权重, 网损与静态电压稳定同等重要, 线路电流指标稍微重要, 计算得到权重分别为: $w_1 = 0.428\,6$, $w_2 = 0.428\,6$, $w_3 = 0.142\,8$ 。

4.2 仿真算例分析

根据上述设置的参数进行仿真, 对综合目标函数值最小进行寻优。通过三种算法的优化得到的对 DG 选址定容的优化结果, 如表 1 所示。

表 1 不同算法得到的适应度解
Tab. 1 Fitness results obtained by different algorithms

算法	迭代次数	运行时间/s	DG 接入位置	DG 接入容量/MW	DG 接入后有功网损/kW	最大静态电压稳定指标	最大支路电流幅值/A	综合目标函数值
PSO	1 000	700.68	5	0.8	38.773 9	0.026 142 14	174.10	0.312 6
			11	0.4				
			29	0.8				
BAS	4 000	302.15	5	0.583 8	39.462 3	0.026 142 26	178.97	0.316 4
			9	0.599 8				
			29	0.760 7				
IBAS	4 000	320.12	5	0.750 9	39.212 2	0.026 142 14	174.20	0.313 6
			13	0.337 2				
			28	0.910 8				

在未接入 DG 时, 通过前推回代法计算潮流分布, 计算得系统有功网损为 201.862 2 kW, 最大静态电压稳定指标值为 0.071 264 64, 在 5 节点处; 最大支路电流为 363.65 kA, 在支路 1 处; 系统的节点电压最小值为 0.913 6 p. u., 出现在 17 节点上。在接入 DG 后, 由表 1 知, 经 IBAS 优化的配网有功网损为 39.212 2 kW, 下降 80.57%; 最大静态电压稳定指标为 0.026 142 14,

下降 63.32%; 最大支路电流为 174.20 kA, 下降 52.10%, 系统节点电压最小值为 0.971 6 p. u., 同样出现在 17 节点处, 提高了 6.35%。图 4 ~ 图 6 分别显示的是在三种算法优化下, 配电网接入分布式电源对电网节点电压、支路电流和节点电压稳定性的影响, 三个图说明 DG 的接入大大改善了配电网的电压稳定和潮流分布, 同时也说明 IBAS 算法运用在 DG 选址定容规

划中是可行的。

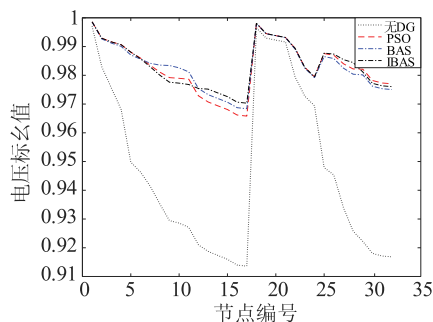


图4 不同算法的节点电压标么值
Fig.4 Node voltage standard value for different algorithms

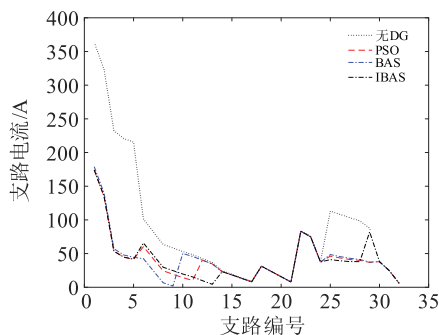


图5 不同算法的支路电流值
Fig.5 Branch current value for different algorithms

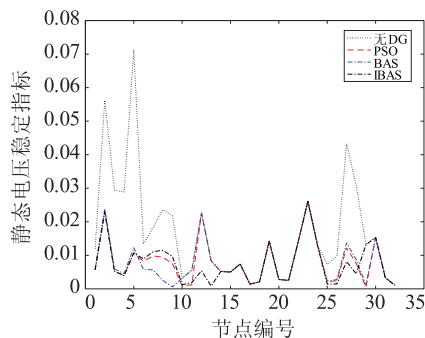


图6 不同算法的节点静态电压稳定指标值
Fig.6 Node static voltage stability index values for different algorithms

在仿真过程中,用 PSO、BAS 和 IBAS 算法计算分别耗时 700.68 s、302.15 s、320.12 s,结合图 3 的收敛曲线图,体现出 BAS 算法具有寻优速度快、收敛速度快的特点。为了比较算法的可重复性和稳定性,采用变异系数法来评价算法的稳定性。

$$CV = \sigma/\mu \quad (21)$$

式中 σ 为数据的标准差; μ 为数据的平均值。变

异系数能较好的评价数据的离散程度,数值越小,变异程度越小,表明数据越稳定。

将这三种算法分别运行 20 次,统计适应度值,经过计算得到的适应度值的平均值、标准值和变异系数。得到表 2。

表2 不同算法重复 20 次适应度值评价

Tab.2 Fitness evaluation value of different algorithm repeats 20 times

算法	平均值 <i>mean</i>	标准值 <i>std</i>	变异系数 <i>CV</i>
PSO	0.325 0	0.008 4	0.025 7
BAS	0.351 5	0.039 5	0.112 3
IBAS	0.325 9	0.007 6	0.023 2

从表 2 可以看出,BAS 算法在没有改进前,算法的稳定性和可重复性都较差,即在算法迭代过程中较易陷入局部最优,全局寻优能力较弱;IBAS 和 PSO 则更加稳定且跳出局部最优能力较高。而 IBAS 与 PSO 相比较,IBAS 的平均值略低于 PSO 算法,表明 IBAS 的寻优精度较差于 PSO,但 IBAS 算法的计算复杂度远小于 PSO,能在较短的时间内找到较优值,这在工程应用中非常有价值。

5 结束语

选用有功网损、静态电压稳定指标以及线路热稳定裕度三个指标,通过层次分析法主观确定三个目标的权重,得到综合目标函数,建立起含多个 DG 的选址定容模型。通过算例仿真,表明该综合模型可以更好的评估多个 DG 接入配电网对电网产生的积极作用。

将 BAS 算法应用于分布式电源选址定容规划中,并引入模拟退火算法中的蒙特卡洛法则对 BAS 进行改进,使其在迭代过程中以一定的概率接受一个较差的解,增加跳出局部最优的概率。算例仿真结果表明 IBAS 算法比 BAS 具有更好的寻优精度以及可重复性稳定性,虽比 PSO 的寻优精度稍劣,但 IBAS 具有收敛速度更快的优点。文中算例表明该算法具有在工程应用中使用的可能性。目前针对 BAS 的研究仍在初期,所做改进提高了算法的可重复性和稳定性,但算法精度还需在后续研究中改进。

参考文献

- [1] 胡骅,吴汕,夏翔,甘德强.考虑电压调整约束的多个分布式电源准入功率计算[J].中国电机工程学报,2006,(19):13-17.
- [2] 雷亚洲,王伟胜,等.一种静态安全约束下确定电力系统风电准入功率极限的优化方法[J].中国电机工程学报,2001,(6):26-29.
- [3] Rau N S, Wan Y H. Optimum location of resources in distributed planning

- [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2002, 9(4): 2014-2020.
- [4] 麻秀范, 崔换君. 改进遗传算法在含分布式电源的配电网规划中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 175-181.
- [5] 韩亮, 王守相, 赵歌. 基于区间 TOPSIS 与遗传算法混合的分布式电源优化配置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 37-42.
- [6] 夏澍, 周明, 李庚银. 分布式电源选址定容的多目标优化算法[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 115-121.
- [7] 刘波, 张焰, 杨娜. 改进的粒子群优化算法在分布式电源选址和定容中的应用[J]. 电工技术学报, 2008, 23(2): 103-108.
- [8] 汪兴旺, 邱晓燕. 基于改进粒子群算法的配电网分布式电源规划[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(14): 16-20, 40.
- [9] Xiangyuan. Jiang, Shuai Li, BAS: Beetle Antennae Search Algorithm for Optimization Problems, International Journal of Robotics and Control, vol. 1, no. 1, 2018, DOI: <https://doi.org/10.5430/ijrc.v1n1p1>, to be printed.
- [10] Jiang X, Li S. Beetle Antennae Search without Parameter Tuning (BAS-WPT) for Multi-objective Optimization[J]. arXiv preprint arXiv:1711.02395, 2017.
- [11] Kirkpatrick S, Gelatt CD Jr, Vecchi MP. Optimization by simulated annealing[J]. Science, 1983, 220(4598): 671-680.
- [12] 叶萌. 分布式电源选址定容及其对配电网可靠性的影响分析[D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [13] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- [14] 王甜甜, 刘强. 基于 BAS-BP 模型的风暴潮灾害损失预测[J]. 海洋环境科学, 2018, 37(3): 457-463.
- [15] 张尧, 王琴, 宋文南, 等. 树状网的潮流算法[J]. 中国电机工程学报, 1998, (3): 217-220.
- [16] Baran M E, Wu FF. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Trans Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.

作者简介:



卢光辉(1992—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统调度自动化及计算机信息处理。
Email: 912138833@qq.com

滕欢(1965—),女,高级工程师,硕士生导师,研究方向为电力系统调度自动化及信息管理等。

廖寒逊(1995—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统调度自动化及计算机信息处理。

吴泽穹(1992—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统调度自动化。

收稿日期:2018-06-14;修回日期:2018-09-29

(王克祥 编发)

(上接第5页)

- Huo Xianxu, Hu Shuju, Xu Honghua. Phase-locked loop algorithm based on adaptive observer under unbalanced grid voltage condition [J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 120-125.
- [8] Svensson J, Bongiorno M, Sannino A. Practical Implementation of Delayed Signal Cancellation Method for Phase-Sequence Separation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(1): 18-26.
- [9] 胡应占, 郭素娜. 适用于电网不平衡时的广义积分器锁相环设计[J]. 电力系统保护与控制, 2014, (11): 148-154.
- Hu Yingzhan, Guo Suna. Design of generalized integrator phase locked loop for unbalanced grid [J]. Power System Protection and Control, 2014, (11): 148-154.
- [10] 徐晟灏, 姜建国, 刘贺, 等. 二阶广义积分锁相环在三电平 SVG 中的应用[J]. 电测与仪表, 2018, 55(4): 34-39.
- Xu Shenghao, Jiang Jianguo, Liu He, et al. Application of the second-order generalized integrator phase locked loop in three-level SVG [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(4): 34-39.
- [11] 陆原, 汪周玮, 郭素兵. 基于单二阶广义积分器的三相数字锁相环设计[J]. 电测与仪表, 2015, 52(6): 96-101.
- Lu Yuan, Wang Zhouwei, Guo Subing. Design of three-phase digital phase locked loop based on single second-order generalized integrator [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2015, 52(6): 96-101.
- [12] 闫朝阳, 贺红艳, 等. 电网电压不平衡时基于二阶广义积分器 SOGI 的 2 倍频电网同步锁相方法[J]. 电源学报, 2014, (6): 93-100.
- Yan Zhaoyang, He Hongyan, et al. Double Fundamental Frequency PLL with Second Order Generalized Integrator under Unbalanced Grid Voltages [J]. Journal of Power Supply, 2014, (6): 93-100.
- [13] 唐轶, 谢永强, 王扬, 等. 基于解耦双同步坐标变换的三相锁相环研究[J]. 电测与仪表, 2017, 54(8): 14-20.
- Tang Yi, Xie Yongqiang, Wang Yang, et al. Study on PLL based on decoupled double synchronous reference frame [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2017, 54(8): 14-20.
- [14] 张兴, 张崇巍. PWM 整流器及其控制 [M]. 机械工业出版社, 2012.

作者简介:



欧阳森(1974—),男,博士,副研究员,研究方向为电能质量分析与控制、智能电器技术。
Email: ouyangs@scut.edu.cn

马文杰(1995—),男,通信作者,硕士研究生,研究方向为新能源并网发电控制及其消纳技术。Email: 1804614459@qq.com

柯清派(1994—),男,硕士研究生,研究方向为新能源并网发电控制及其消纳技术。

苏为健(1994—),男,硕士研究生,研究方向为新能源并网发电控制及其消纳技术。

收稿日期:2018-06-05;修回日期:2018-10-15

(王克祥 编发)