

考虑负荷不确定性的变电站选址定容

高付良¹, 张鹏¹, 赛雪², 赛丽²

(1. 河南开封供电公司, 河南 开封 475003; 2. 河南开封京宇电力公司, 河南 开封 475003)

摘要: 提出了一种参数自适应微分进化算法 (PSADE) 来解决配电网变电站选址定容问题。根据算法中变异权重因子和交叉因子对进化过程的影响, 经分析认为提高算法性能的关键在于平衡大范围搜索和小范围集中寻优之间的矛盾, 通过为种群中个体设置单独的变异权重因子和交叉因子, 以进化过程中个体适应度函数值的增量为依据对参数进行动态调整, 提高算法的全局寻优能力。在变电站选址定容的数学模型中, 考虑负荷预测结果误差对规划的影响, 采用三角模糊数描述负荷的不确定性, 根据投资费用的模糊期望值构造适应度函数。通过对典型的函数优化问题和实际变电站规划问题的寻优结果分析, 验证了所提方法具备更好的全局寻优能力, 规划方案经济可行。

关键词: 变电站; 规划; 微分进化; 自适应; 选址定容

Substations locating and sizing in uncertainty load environment

GAO Fu-liang¹, ZHANG Peng¹, SAI Xue², SAI Li²

(1. Henan Kaifeng Power Supply Company, Kaifeng 475003, China; 2. Kaifeng Jing-yu Power Company, Kaifeng 475003, China)

Abstract: A parameter self-adaptive differential evolution algorithm (PSADE) for locating and sizing distribution substations is proposed. According to the function of mutation weighting factor and crossover factor on differential evolution (DE), the key factor to improve the performance is on the equilibrium between exploration of the entire search space and exploitation of the space already visited. The separate parameters for each individuals and the corresponding updating scheme of evolution procedure are designed. On the problem formulation of substation locating and sizing, the uncertainty of load forecasting result is considered. The fitness function is formulated based on fuzzy expected value model of investment costs. From the testing results of two well known benchmark problems and two practical substation planning areas, it is observed that the proposed PSADE is more efficient than DE and PSO, and the planning results are economical and applicable.

Key words: substation; planning; differential evolution; self-adaptive; locating and sizing

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0075-06

0 引言

变电站优化规划属于大规模组合优化问题, 解决问题的方法包括早期的数学优化方法^[1-2]、启发式算法^[3-4]到现在广泛采用的智能优化算法^[5-7]及多种方法结合的混合算法^[8-9], 虽然变电站规划方法有了很大的发展, 但无论是从数学模型还是优化方法上都存在很多方面的不足。

微分进化DE (Differential Evolution) 是由Storn和Price在1995年提出的一种高效率的智能优化算法^[10-11]。优点在于收敛速度快, 对各种非线性函数适应性强, 尤其适应于多变量复杂问题的寻优。因此, 在提出后得到了多方面密切关注, 并成功应用于电力系统无功优化、经济负荷分配和配电网重构

等领域^[12-16]。

本文考虑负荷不确定因素对变电站规划的影响, 并提出一种参数自适应微分进化算法, 通过实际规划算例的计算分析, 对方法的有效性进行验证。

1 变电站规划的数学模型

1.1 变电站规划的最小费用模型

变电站选址问题可描述为: 在规划目标年负荷分布已知的情况下, 为了满足一定的负荷需求, 以最小的投资和年运行费用 (包括变电站、馈线的运行与投资费用, 线损费用等) 为目标函数, 确定变电站的数量、位置、变压器的容量组合以及变电站的供电范围, 具体的数学描述为

$$\min C = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 \quad (1)$$

$$C_1 = \sum_{i=1}^N \left\{ f(s_i) \left[\frac{r_0(1+r_0)^m}{(1+r_0)^m - 1} \right] + u(s_i) \right\} \quad (2)$$

$$C_2 = \alpha \sum_{i=1}^M \sum_{j \in J_i} \tilde{p}_j d_{ij} \left[\frac{r_0(1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \right] \quad (3)$$

$$C_3 = \beta \sum_{i=1}^M \sum_{j \in J_i} \tilde{p}_j^2 d_{ij} \quad (4)$$

$$C_4 = \mu(x_i, y_i, s_i) \quad (5)$$

约束条件:

$$r_i \sum_{j \in J_i} \tilde{p}_j \leq s_i / r_{i\min} \quad i=1, 2, \dots, N \quad (6)$$

$$d_{ij} \leq d_{\max} \quad (7)$$

其中: C_1 为折算到每年的变电站投资及运行费用; C_2 为折算到每年的变电站低压侧馈线的投资费用; C_3 为变电站低压侧馈线年网损费用; C_4 为变电站建站用地费用增额; s_i 为第 i 个变电站的容量; $r_{i\min}$ 为第 i 个变电站最小容载比; r_i 为同时率; r_0 为贴现率; N 为所需投建的变电站和已有变电站的总和; M 为负荷点的总数; m 为所需投建变电站的寿命; n 为所需投建变电站低压侧馈线的寿命; $f(s_i)$ 为所需投建变电站的投资成本; $u(s_i)$ 为所需投建变电站的运营成本; \tilde{p}_j 为负荷点 j 的负荷值, 为模糊数; J_i 为由变电站 i 供电的所有负荷点; α 为馈线投资因数; β 为馈线网损因数; (x_i, y_i) 为变电站站址地理坐标; (x_j, y_j) 为负荷点的地理坐标; $d_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$ 为变电站 i 和负荷点 j 之间的距离; d_{\max} 为最大允许供电半径。

1.2 负荷点的模糊模型

负荷预测的结果存在不可避免的不确定性。针对电力系统的一些不确定因素, 常采用三角模糊数描述^[17-18], 如图 1 所示。

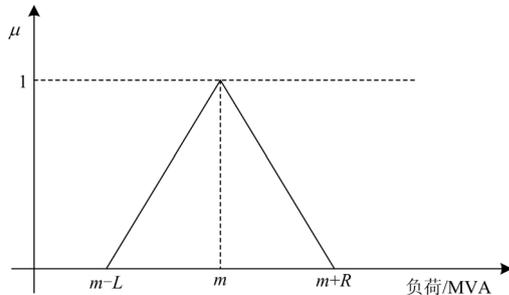


图 1 负荷点的三角模糊负荷模型

Fig.1 Triangle fuzzy load model of load point

模糊负荷的隶属度函数为:

$$\mu(t) = \begin{cases} \frac{t-(m-L)}{L}, & t \leq m \\ \frac{(R+m)-t}{R}, & t \geq m \end{cases} \quad (8)$$

其中: m 为负荷点的预测结果值; L 和 R 分别表示结果可能存在的负向和正向偏差。

由式 (3)、(4)、(6) 可知, 在进行规划的费用目标函数计算和约束条件处理时, 需要涉及到模糊数的比较和计算。文献[19]中讨论了三角形模糊函数的计算方法, 在加减运算后, 三角模糊数形式不变, 乘法运算将导致结果不再是三角模糊数, 这时可进行近似处理。模糊数的比较则采用文献[18]中讨论的位移方法, 用模糊数相对于实数 0 的位移作为模糊数大小的指标。以负荷点的模糊值 $\tilde{P} = (P_L, P_m, P_R)$ 为例, 定义其与实数 $k=0$ 之间的位移量:

$$R(\tilde{P}, 0) = \frac{w_1 P_L + w_2 P_m + w_3 P_R}{w_1 + w_2 + w_3} \quad (9)$$

式中, w_1, w_2, w_3 为位移权重系数, 其值的选取原则是: 当决策者比较乐观并重视费用的最小可能值时, 可将权重系数 w_1 取得相对大些; 当决策者比较谨慎并重视费用的最大可能值时, 可将权重系数 w_3 取得相对大些。根据问题的特点和决策者的决策意向, 对权重系数 w_1, w_2, w_3 取不同的值, 即可得到不同的、适合问题特点的模糊数比较方法。

2 参数自适应微分进化算法

2.1 基本 DE 算法

2.1.1 初始化

在寻优时首先需要确定种群数量并产生初始种群。通常的生成方法是从给定边界约束内的值中随机选择, 应该覆盖整个参数空间。设第 i 个体 $X_i = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,n}), x_i \in R, n$ 为问题解空间的维数, 初始种群 $S = \{X_1, X_2, \dots, X_{NP}\}, X_i \in R^n, NP$ 为种群的大小。一般个体向量 X_i 的各个分量按式 (10) 产生:

$$x_{i,j} = x_{i,j\min} + \rho \left|_0^1 (x_{i,j\max} - x_{i,j\min}) \right| \quad (10)$$

式中: $x_{i,j}, x_{i,j\max}, x_{i,j\min}$ 分别为个体向量 X_i 的第 j 个分量以及第 j 个分量的上限和下限; $\rho \left|_0^1$ 表示 0 到 1 之间的随机数。

2.1.2 变异

对于第 k 代个体向量 X_i^k , 在变异后产生向量

$V_i^{k+1} = (v_{i,1}^{k+1}, v_{i,2}^{k+1}, \dots, v_{i,n}^{k+1})$, 计算方法如式 (11):

$$v_{i,j}^{k+1} = x_{r_1,j}^k + F \cdot (x_{r_2,j}^k - x_{r_3,j}^k) \quad (11)$$

其中: $x_{r_1,j}^k, x_{r_2,j}^k, x_{r_3,j}^k$ 是从第 k 代除 X_i^k 之外的个体中随机选取出来的 3 个不同个体的第 j 分量, 所以种群数量必须满足 $NP \geq 4$, 系数 F 为变异权重因子。此外, 还存在另外三种形式的变异方法, 但本文所述方法使用较为广泛。

2.1.3 交叉

为了增加种群中个体的多样性, $U_i^{k+1} = (u_{i,1}^{k+1}, u_{i,2}^{k+1}, \dots, u_{i,n}^{k+1})$ 由变异向量和源向量生成, 各个分量按式 (12) 计算:

$$u_{i,j}^{k+1} = \begin{cases} v_{i,j}^{k+1} & \text{if } (\rho|_0 \leq CR, \text{ or } j = q_j) \\ x_{i,j}^k & \text{else} \end{cases} \quad (12)$$

其中: q_j 是从 $[1, n]$ 中随机选取的一个整数, 用以保证本次进化过程必须有一位执行交叉; 交叉因子 $CR \in [0, 1]$ 为算法参数, 需要事先确定。

2.1.4 选择

在 DE 中使用的是一种“贪婪”选择模式, 当且仅当新个体的评价函数值更好时, 才被保留到下一代群体中, 否则, 父个体仍然保留在群体中, 再一次作为下一代的父向量。

$$X_i^{k+1} = \begin{cases} X_i^k & \text{if } f(U_i^k) > f(X_i^k) \\ U_i^k & \text{else} \end{cases} \quad (13)$$

2.2 DE 的控制参数分析

DE 包括三种控制参数, NP 表示种群大小, F 表示变异权重因子, CR 表示交叉因子。种群大小一般取 $2n \leq NP \leq 20n$, NP 越大搜索的鲁棒性就越大。 CR 的主要作用是对目标结果起微调效果, 通常设定范围是 $0.3 \leq CR \leq 0.9$, CR 太大会加大进化的混乱程度并降低收敛速度, CR 小会导致种群较快地丧失多样性。算法中对搜索过程起较大作用的是权重因子 F , 通常对 F 的选择有两种观点, 分别是 $F \in [0, 2]$ 和 $F \in [2/NP, 1]$, 小的 F 会导致对已知空间的集中搜索, 并由此而容易陷入局部最优, 大的 F 会造成大范围的搜索而严重影响收敛速度。因此, F 和 CR 选取的关键在于平衡提升全局搜索范围与降低集中寻优能力之间的矛盾^[21]。

2.3 参数自适应微分进化算法

本文提出的参数自适应算法 PSADE (Parameter Self-adaptive Differential Evolution), 为种群中每个个体 X_i 设置单独的变异权重因子 F_i 和交叉因子 CR_i , 然后根据进化过程中每个个体适应度函数值的增量对 F_i 和 CR_i 进行动态调整。

参数初始化采用类似种群初始化的方法:

$$F_i^0 = F_L + \rho|_0 (F_U - F_L) \quad (14)$$

$$CR_i^0 = CR_L + \rho|_0 (CR_U - CR_L) \quad (15)$$

其中: F_U 、 CR_U 和 F_L 、 CR_L 分别为 F 和 CR 的上下边界。式 (14)、(15) 表示分别从 $[F_L, F_U]$ 、 $[CR_L, CR_U]$ 区间内随机计算参数的初始值 F_i^0 和 CR_i^0 。

在 DE 进化 α 代后, 计算个体 X_i 的适应度函数值增量

$$\Gamma_i^{\text{adapt}} = \sum_{l=k-\alpha}^k (f(X_i^{l-1}) - f(X_i^l)) = f(X_i^{l-\alpha}) - f(X_i^l) \quad (16)$$

由于 DE 的选择方法能保证 $f(X_i^l) \leq f(X_i^{l-1})$, 所以 $\Gamma_i^{\text{adapt}} \geq 0$ 。

再将矢量 Γ^{adapt} 以降序形式保存到 Γ^{str} 中, F 和 CR 值的更新规则分别为

$$F_i^{k+\alpha} = \begin{cases} F_i^k - \rho|_0 F_i^k / 10, & \text{if } \Gamma_i^{\text{adapt}} \geq \Gamma_{[NP/\beta]}^{\text{str}} \\ F_L + \rho|_{0.5} (F_U - F_L) & \text{else} \end{cases} \quad (17)$$

$$CR_i^{k+\alpha} = \begin{cases} CR_L, & \text{if } \Gamma_i^{\text{adapt}} \geq \Gamma_{[NP/\beta]}^{\text{str}} \\ CR_L + \rho|_0 (CR_U - CR_L) & \text{else} \end{cases} \quad (18)$$

式中: β 的取值确定被更新参数的比例, 必须满足 $\beta \geq 1$, 且 NP/β 的取值取整数。

式 (17)、(18) 分别表示: 根据 α 代进化后, 个体 X_i 的适应度函数值增量来更新参数 F_i 和 CR_i 的方法, 一方面, 对寻优效果较好的个体 (即适应度函数值增量较大, 满足 $\Gamma_i^{\text{adapt}} \geq \Gamma_{[NP/\beta]}^{\text{str}}$), 通过设置较小的 F 、 CR 来实现对当前区域进一步寻优; 另一方面, 对寻优效果相对较差的个体 (即适应度函数值增量较小, 满足 $\Gamma_i^{\text{adapt}} < \Gamma_{[NP/\beta]}^{\text{str}}$), 随机更新 F 、 CR , 保证每一代中都存在部分个体的 F 、 CR 值较大, 提高算法的搜索范围并保持种群的多样性。上述方法可以一定程度上平衡局部集中寻优与大范围搜索之间的矛盾。

F 和 CR 值更新后, 算法将执行后续的 α 轮迭代, 不断重复这个过程, 直到满足算法终止条件。

更新过程需要对 α 、 β 和 $[F_L, F_U]$ 进行设置, α 控制更新间隔, α 过大会导致一些较差的 F 、 CR 值长时间停留在进化过程中, 降低算法的效率, α 过小时又会影响种群的适应过程。而 β 的取值会

对参数更新的差异度产生影响。根据 DE 算法中对 F 和 CR 的推荐范围, 选取 $[F_L, F_U] = [0.1, 0.9]$, $[CR_L, CR_U] = [0.1, 0.9]$ 。根据实验过程中算法的总进化代数数和适应度函数值增量 Γ_i^{adapt} 的差异性, 选取 $\alpha = 5$, $\beta = 2$, 即每进化 5 代更新一次 F 、 CR , 更新的原则是局部寻优和大范围搜索各占一半。

3 考虑负荷模糊性的变电站选址与定容

3.1 适应度函数的构造

变电站选址定容问题是一个最小值问题, 可直接用外点法构造适应度函数, 将状态变量约束以罚函数形式计入函数中。由于考虑了负荷的模糊特性, 线路投资费用和线损费用为三角模糊量, 适应度函数采用目标函数的模糊期望值^[20]来构造:

$$f = E[C] = C_1 + \tilde{C}_2 + \tilde{C}_3 + C_4 + \lambda \varphi \left(\sum_{j \leq J_i} \tilde{p}_j - s_i / r_i \right) + \gamma \sum_{i=1}^N \sum_{j \leq J_i} \varphi(d_{ij} - d_{\max}) \quad (19)$$

其中: \tilde{C}_2 、 \tilde{C}_3 、 \tilde{p}_j 为模糊量; λ 、 r 为很大的正整数, 用作惩罚因子, φ 函数定义为

$$\varphi(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

3.2 变电站个数的确定

首先根据规划区水平年总负荷 p 以及规划区对变电站容载比 r (一般取 1.8~2.3 之间) 的要求, 确定所需变电站总容量 $s = pr$; 然后根据已有变电站容量 s_y , 以及增容情况确定新建变电站的总容量 $s_x = s - s_y - \sum_{i=1}^m s_z$, 其中: s_z 为第 z 个已有变电站在规划水平年所增容量; m 为已有变电站个数。

在确定了规划水平年新建变电站总容量之后, 根据可行的变电站容量组成 S_c , 按容量组成的大小升序排列为 $\{s_{c1}, s_{c2}, \dots, s_{cn}\}$ 。考虑负荷空间分布的不均衡所导致的变电站所带负荷不均衡, 本文采用以下方法确定新建变电站个数:

$$n = \left\lceil \alpha \cdot \frac{s_x}{\text{aver}(S_c)} \right\rceil \quad (20)$$

式中: n 为新建变电站个数; $\lceil \cdot \rceil$ 表示取计算结果的整数部分; α 为冗余因子, 一般取 1.0~1.4。

由于对负荷是采用模糊数表示, 因此新建变电站的总容量 s_x 也是模糊数, 在计算 n 时结果可能包含多个整数, 这种情况下可根据不同的数量分别进行计算, 综合确定最优方案。

3.3 结合地理信息的种群编码与选取策略

变电站规划过程通常结合地理信息系统 (GIS) 进行, 是对连续的可建站区域进行搜索, 因此, 可选用站址的地理坐标及容量来构建个体编码。如图 2 所示, 每个个体代表一种选址方案, 编码长度表示此地区需新建变电站 n 座, x_i , y_i , s_i 分别为变电站的横坐标、纵坐标和容量。

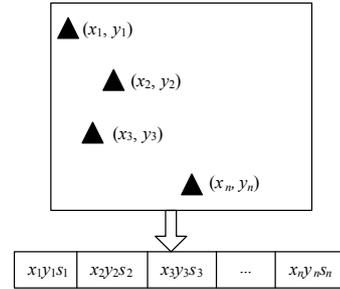


图 2 个体编码方法

Fig.2 Individual encoding method

在选取初始种群时, 对每个个体为主, 根据式 (10) 随机选取新建站的坐标及容量:

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i\min} + \rho \Big|_0^1 (x_{i\max} - x_{i\min}) \\ y_i &= y_{i\min} + \rho \Big|_0^1 (y_{i\max} - y_{i\min}) \\ s_i &= \text{rand} \{S_c\} \end{aligned}$$

其中: $x_{i\min}$, $y_{i\min}$, $x_{i\max}$, $y_{i\max}$ 分别为规划区域横、纵坐标的最小值和最大值; $\rho \Big|_0^1$ 表示在 $[0,1]$ 区间内均匀分布的随机数; $\text{rand} \{S_c\}$ 表示从变电站候选容量集合 $S_c = \{s_{c1}, s_{c2}, \dots, s_{cn}\}$ 随机选取一个元素。

在 GIS 中, 变电站位置是以坐标点的形式表示, 根据实际情况可能存在坐标点的选取不在规划地块上或落在不可行区域中, 这时需要判断位置点和规划区域以及不可行区域之间的关系, 并进行调整, 具体方法可参见文献[5]所述。

3.4 变电站选址与定容步骤

结合变电站选址的数学模型及参数自适应微分进化算法, 方法的总体流程如图 3 所示。

4 算例分析

4.1 算例一

某经济技术开发区占地约 14 km^2 , 规划基础年为 2006 年, 水平年为 2020 年, 采用负荷密度指标和划分小区的空间负荷预测方法, 到 2020 年该区负荷达到 360.65 MW, 共 158 个负荷点, 平均负荷密

度达到 25.76 MW/平方公里。设新建变电站候选容量 s_{c1} 、 s_{c2} 、 s_{c3} 分别为 4×40 MVA, 4×50 MVA, 4×63 MVA。采用三角模糊数来表示各负荷点的模糊特性, 根据中、长期负荷预测的误差情况, L 、 R 分别取预测值的 $\pm 10\%$, 负荷数比较时取 w_1 , w_2 , w_3 分别为 0.3, 0.6, 0.1。

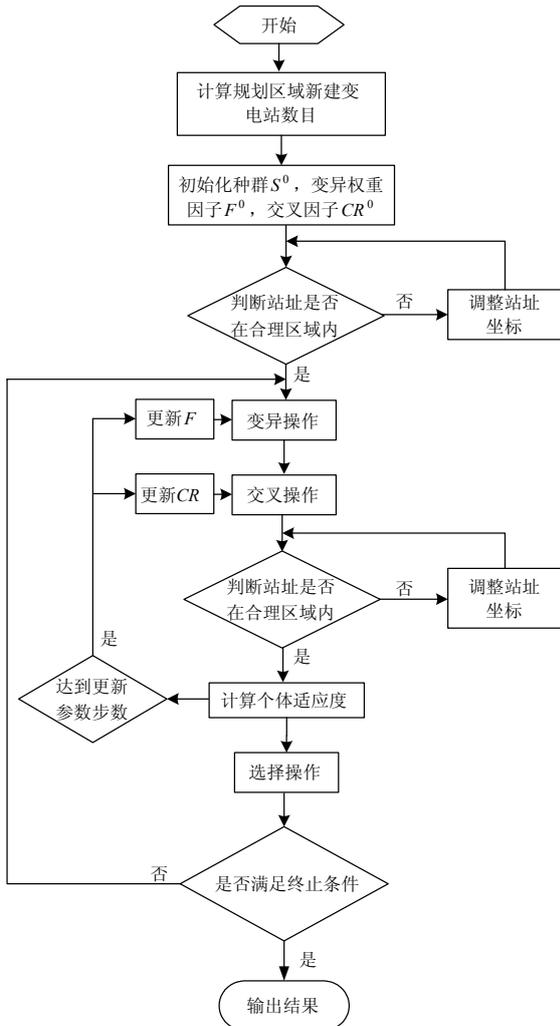


图 3 基于 PSADE 的变电站选址定容流程

Fig.3 Substation locating and sizing procedure based on PSADE

分别使用 PSADE、DE、PSO 算法求解此问题, PSADE 种群规模 $NP=40$, F 、 CR 完全自适应动态调整; DE 采用文献[21]的参数设置, 种群规模 $NP=40$, F 和 CR 采用分阶段调整, 前期为 0.8 和 0.35, 后期为 0.4 和 0.15; PSO 算法也采用参数动态调整的形式^[22], 群体设为 30, 前期 C_1 和 C_2 取 1.8, w 取 0.9, 后期 C_1 和 C_2 取 0.3, w 取 0.1。最大进化代数设为 200, 所得规划结果比较如表 1 所示。

表 1 算例一的变电站规划结果

Tab.1 Substation planning results of case 1

方法	数量	容量 / MVA	容量组合	总投资费用 / 万元	总投资期望费用 / 万元
PSADE	4	680	S_{c1} , S_{c1} , S_{c2} , S_{c1}	(5 384.4, 5 502.5, 5 625)	5 503.6
DE	4	680	S_{c1} , S_{c1} , S_{c2} , S_{c1}	(5 398.2, 5 518.3, 5 642.9)	5 519.4
PSO	4	680	S_{c2} , S_{c1} , S_{c1} , S_{c1}	(5 470.8, 5 601.6, 5 737.4)	5 602.8

4.2 算例二

某区占地约 194.72 km², 现有 110 kV 变电站 19 座 (其中用户站 4 座), 规划基础年为 2006 年, 水平年为 2020 年, 采用负荷密度指标和划分小区的空间负荷预测方法。到 2020 年该区负荷达 2 693.22 MW (用户站所带负荷为 124.96 MW), 共 1 913 个负荷点, 平均负荷密度达 13.83 MW/km²。新建变电站候选容量及负荷模糊性的处理与算例一相同。

仍采用上述三种算法求解此问题, 种群规模 NP 分别设为 80, 80, 50, 最大进化代数数为 500, 其他参数与算例一保持一致, 所得规划结果如表 2 所示。

表 2 算例二的变电站规划结果

Tab.2 Substation planning result of case 2

方法	数量	总容量 / MVA	容量组合	总投资费用 / 万元	总投资期望费用 / 万元
PSADE	10	1824	S_{c1} , S_{c1} , S_{c2} , S_{c1} , S_{c3} , S_{c1} , S_{c3} , S_{c1} , S_{c1} , S_{c1}	(23 759, 25 140, 26 588)	25156.8
DE	10	1772	S_{c1} , S_{c1} , S_{c2} , S_{c1} , S_{c1} , S_{c1} , S_{c2} , S_{c1} , S_{c3} , S_{c1}	(24 663, 26 103, 27 617)	26121.5
PSO	10	1824	S_{c1} , S_{c1} , S_{c2} , S_{c1} , S_{c3} , S_{c1} , S_{c1} , S_{c3} , S_{c1} , S_{c1}	(26 021, 27 738, 29 591)	27772

4.3 算法的进化性能分析

采用算例一作为算法进化性能分析的对象,以总投资期望费用作为输出结果,采用上述三种方法分别计算 10 次取平均值,进化曲线的结果比较如图 4 所示。在进化的初期,随机产生了部分较大的 F 、 CR 值,保证算法的全局搜索能力和种群的差异度;在进化的后期,当其他方法的计算结果陷入局部最优解时,PSADE 对部分陷入局部最优的个体,总能相应产生较大的 F 值,增大跳出局部最优解的概率,与此同时,针对部分进化较好的个体,较小的 F 值提供了更强的小范围集中搜索能力。

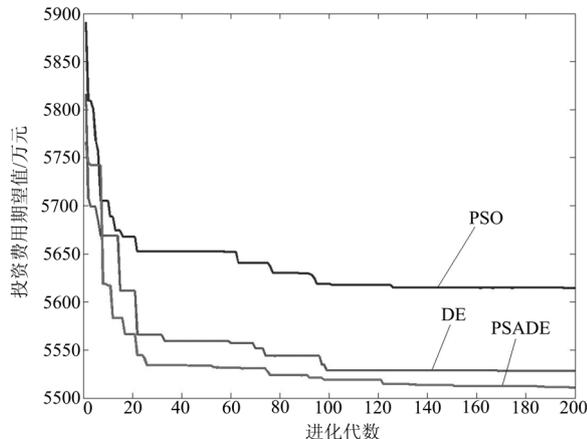


图 4 算法的平均适应度结果比较

Fig.4 Average fitness result comparison

5 结论

在变电站选址定容的数学模型中,采用三角模糊数描述负荷的不确定性,通过投资费用的模糊期望值构造适应度函数,充分考虑了负荷预测误差对规划结果的影响。参数自适应微分进化算法在变电站规划实例中都表现出良好的寻优性能。

参考文献

- [1] Crawford D M, Holt S B. A mathematical optimization technique for locating and sizing distribution substations, and deriving their optimal service areas[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2): 230-235.
- [2] Thompson G L, Wall D L. A branch and bound model for choosing optimal substation locations[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1981, 100(5): 2683-2688.
- [3] Lo K L, Nashid I. Interactive expert system for optimal design of electricity distribution systems[J]. IEE Proc-Gener, Transm, and Distrib, 1996, 143(2): 151-156.
- [4] DAI Hong-wei, YU Yi-xin, HUANG Chun-hua, et al. Optimal planning of distribution substation locations and size-model and algorithm[J]. Electrical Power and Energy Systems, 1996, 18(6): 353-357.
- [5] 刘自发, 张建华. 基于改进多组织粒子群体优化算法的配电网变电站选址定容[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 105-111.
LIU Zi-fa, ZHANG Jian-hua. Optimal planning of substation locating and sizing based on refined multi-team PSO algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 105-111.
- [6] Eloy Díaz-Dorado, Pidre José Cidrás, Edelmiro Míguez García. Planning of large rural low-voltage networks using evolution strategies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18(4): 1594-1600.
- [7] Haghifam M R, Shahabi M. Optimal location and sizing of HV/MV substations in uncertainty load environment using genetic algorithm[J]. Electric Power Systems Research, 2002, 63: 37-50.
- [8] 王成山, 刘涛, 谢莹华. 基于混合遗传算法的变电站选址定容[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 30-34, 47.
WANG Cheng-shan, LIU Tao, XIE Ying-hua. Substation locating and sizing based on hybrid genetic algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 30-34, 47.
- [9] Carrano E G, Takahashi R H C, Cardoso E P, et al. Optimal substation location and energy distribution network design using a hybrid GA-BFGS algorithm[J]. IEE Proc-Gener, Transm, Distrib, 2005, 152(6): 919-926.
- [10] Storn R, Price K. Minimizing the real functions of the ICEC'96 contest by differential evolution[C].//1996 IEEE Evolutionary Computation Conference. Nayoya (Japan): 842-844.
- [11] Storn R, Price K. Differential evolution – a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous space[J]. Global Optimization, 1997, 11(4): 341-359.
- [12] Su Ching-Tzong, Lee Chu-Sheng. Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(3): 1022-1027.
- [13] Chiou Ji-Pyng, Lee Chung-Fu, Su Ching-Tzong. Variable scaling hybrid differential evolution for solving network reconfiguration of distribution systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(2): 668-678.
- [14] Liang C H, Chung C Y, Wong K P, et al. Parallel optimal reactive power flow based on cooperative co-evolutionary differential evolution and power system decomposition[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2007, 22(1): 249-257.

(下转第 109 页 continued on page 109)

形象地反映电力系统的各种工况和继电保护的动态行为特性,完全可以作为继电保护课程的辅助教学工具,加深学生对于继电保护知识的理解和掌握。然而,继电保护是一门涉及多个领域的交叉学科,其包含内容多而复杂,仅仅运用仿真软件(如Matlab、EMTP、EMTDC等)提供的既有模型往往不能满足要求,需要在理论研究的基础上,开发出更多更适用于继电保护研究和学习的仿真模型。

参考文献

- [1] 贺家李,宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005.
- [3] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [4] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2002.
- [5] 李海涛,邓樱. Matlab 程序设计教程[M]. 北京: 高等教育出版社.
- [6] Matlab 6.1, reference manual[S]. Math Works, Inc. 2001.
- [7] Simulink 4.1, reference manual[S]. Math Works, Inc. 2001.

- [8] XU Ming, GAO Hou-lei, YAN Chao. Matlab/simulink based dynamic simulation system for distance protection[J]. Transactions of Tianjin University, 2008, 14 (2): 112-117.
- [9] 刘强,蔡泽祥. 基于MATLAB的变压器差动保护闭环仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (9): 31-34. LIU Qiang, CAI Ze-xiang. Study on closed-loop simulation of transformer differential protection based on MATLAB[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (9): 31-34.

收稿日期: 2009-09-03; 修回日期: 2009-11-05

作者简介:

许明(1980-),男,博士研究生,主要从事继电保护数字仿真方面的学习和研究; E-mail:xuming@mail.sdu.edu.cn

高厚磊(1963-),男,教授,博士生导师,主要从事继电保护和广域同步测量方面的教学和研究工作; E-mail:houleig@sdu.edu.cn

侯梅毅(1963-),男,博士研究生,副教授,主要从事继电保护方面的教学和研究工作;

(上接第 80 页 continued from page 80)

- [15] Perez-Guerrero R E, Cedeno-Maldonado J R. Differential evolution based economic environmental power dispatch[C]. //Power Symposium, Proceedings of the 37th Annual. North American: 2005:191-197.
- [16] 梁才浩,段献忠,钟志勇,等. 基于差异进化和 PC 集群的并行无功优化[J]. 电力系统自动化, 2006, 30 (1): 29-34. LIANG Cai-hao, DUAN Xian-zhong, Chung C Y, et al. Parallel reactive power optimization based on differential evolution and PC-cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (1): 29-34.
- [17] 郑智,周双喜,徐飞,等. 基于多场景和模糊技术的综合无功规划[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (4): 41-45. ZHENG Zhi, ZHOU Shuang-xi, XU Fei, et al. Comprehensive reactive power planning based on multi-scenario and fuzzy technique[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (4): 41-45.
- [18] 鞠平,李靖霞. 配电网模糊优化规划(1)——模型与方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (14): 45-48. JU Ping, LI Jing-xia. Optimized fuzzy planning of distribution power networks: part one——model and methodology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (14): 45-48.
- [19] 曹炳元. 应用模糊数学与系统[M]. 北京: 科学出版社,

2005.

CAO Bing-yuan. Application of fuzzy mathematical and systems[M]. Beijing: Science Press, 2005.

- [20] LIU Bao-ding, LIU Yian-kui. Expected value of fuzzy variable and fuzzy expected value models[J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2002, 10 (4): 445-450.
- [21] 牛卫平,刘自发,张建华,等. 基于GIS和微分进化算法的变电站选址及定容[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (18): 86-90. NIU Wei-ping, LIU Zi-fa, ZHANG Jian-hua, et al. Substation locating and sizing in power system based on GIS and differential evolution algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (18): 86-90.
- [22] ZHENG Yong-ling, MA Long-hua, ZHANG Li-yan, et al. Empirical study of particle swarm optimizer with an increasing inertia weight[C].//The 2003 Congress on Evolutionary Computation, CEC. Canberra(Australia): 2003:221-226.

收稿日期: 2009-04-27; 修回日期: 2009-10-30

作者简介:

高付良(1979-),男,助理工程师,长期从事电力生产工作;

张鹏(1979-),男,助理工程师,长期从事继电保护工作; E-mail: zhp531@163.com

赛雪(1979-),女,助理工程师,长期从事电力生产工作。