

# 基于加权 $K$ -means 聚类和遗传算法的变电站规划

成乐祥<sup>1</sup>, 季丽<sup>2</sup>

(1. 国网南京供电公司, 江苏南京 210019; 2. 国网江苏省电力公司电力科学研究院, 江苏南京 211103)

**摘要:** 针对变电站规划问题, 提出了基于加权  $K$ -means 聚类的变电站供电范围划分方法, 并在此基础上提出了基于加权  $K$ -means 聚类和遗传算法的变电站规划算法。该算法运用遗传算法的全局搜索能力确定变电站的座数、主变台数和容量的最优组合, 解决了应用加权  $K$ -means 聚类算法划分变电站供电范围时初始聚类数确定的问题。加权  $K$ -means 聚类算法能够综合考虑变电站的负载率和供电半径的约束, 并在迭代过程中自适应调节。算例结果表明所提算法能够较好地求解变电站优化规划问题。

**关键词:** 变电站规划; 加权  $K$ -means 聚类算法; 遗传算法; 变电站站址; 供区优化

**中图分类号:** TM721

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-0665(2016)06-0009-04

在电网规划过程中, 变电站规划是工程建设前期工作的一个重要环节, 对整个工程建设的投资费用和投产后的运行安全可靠性及生产的综合经济效益起重要作用。变电站站址、容量的选择直接决定了规划的合理性和经济性, 并影响电网运行和电能质量<sup>[1]</sup>。目前, 国内外对变电站优化规划的问题研究较多, 大体可分为数学优化方法<sup>[2,3]</sup>、启发式优化方法<sup>[4,5]</sup>及现代智能优化方法。其中智能优化算法主要包括遗传算法<sup>[6]</sup>、粒子群算法<sup>[7]</sup>、微分进化算法<sup>[8]</sup>和云理论<sup>[9]</sup>等, 这些算法在求解大规模问题时能够获得最优解或者近似最优解, 但仍然存在收敛速度较慢、局部寻优能力不足等缺陷。

近年来一些学者提出了新的方法: 文献[10]采用冗余网格动态减少方法划分供电范围; 文献[11]采用动态规划方法建立了多阶段优化规划模型; 文献[12,13]提出了采用加权 Voronoi 图进行变电站优化规划; 文献[14,15]采用改进  $K$ -means 算法解决变电站供电范围划分问题, 但需事先确定聚类数; 文献[16]采用加权 Voronoi 图划分变电站供电范围, 但其自适应调节权重的方法主要考虑变电站的负载率, 不能有效约束供电半径。聚类分析作为一种被广泛应用的数据挖掘算法, 能够以较高的处理效率获得数据在全局范围内的分布特征, 并逐步应用到电力领域<sup>[17-19]</sup>。本文采用加权  $K$ -means 聚类算法划分变电站的供电范围, 用遗传算法确定变电站的座数、变压器的台数和容量。该方法解决了应用加权  $K$ -means 聚类算法划分变电站供电范围时初始聚类数确定的问题, 同时确定了最优的变电站座数、变压器台数和容量组合。

## 1 变电站规划的数学模型

变电站规划的目标是: 在负荷分布已知的条件

下, 以变电站的供电能力和供电半径为约束条件, 以投资和运行费用最小为目标, 确定最优的变电站座数、位置、供电范围以及变压器的台数和容量。

变电站规划的数学模型可以表示为:

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

s.t.

$$\lambda \sum_{j \in J_i} W_j \leq S_i e(S_i) \cos \theta \quad i=1, 2, \dots, K \quad (2)$$

$$d_{ij} \leq D \quad i=1, 2, \dots, K; j \in J_i \quad (3)$$

式(1—3)中:  $C$  为变电站和电网投资及运行的等年值费用之和;  $C_1$  为变电站投资及运行的等年值费用;  $C_2$  为馈线投资的等年值费用;  $C_3$  为馈线网损的等年值费用;  $J_i$  为由变电站  $i$  供电的负荷集合;  $W_j$  为负荷点  $j$  的有功功率;  $\lambda$  为负荷同时率;  $S_i$  为变电站  $i$  的容量;  $e(S_i)$  为变电站  $i$  的负载率;  $\cos \theta$  为功率因数;  $K$  为已有和新建变电站的总数;  $d_{ij}$  为第  $i$  个变电站到第  $j$  个负荷之间的线路长度;  $D$  为变电站允许的最大供电半径。

$C_1, C_2, C_3$  具体可表示为:

$$C_1 = \sum_{i=1}^K [(p_{\text{fix}} + p_{\text{var}} S_i) \frac{r_0 (1+r_0)^m}{(1+r_0)^m - 1} + p_{\text{op}} S_i] \quad (4)$$

$$C_2 = \sum_{i=1}^K \sum_{j \in J_i} p_{\text{line}} d_{ij} \frac{r_0 (1+r_0)^n}{(1+r_0)^n - 1} \quad (5)$$

$$C_3 = \sum_{i=1}^K \sum_{j \in J_i} p_e r \tau_{\text{max}} d_{ij} \frac{P_{ij}^2 + Q_{ij}^2}{U_N^2} \quad (6)$$

式(4—6)中:  $p_{\text{fix}}$  为变电站的固定投资费用;  $p_{\text{var}}$  为变电站单位容量的投资费用;  $p_{\text{op}}$  为变电站单位容量年运行费用;  $r_0$  为投资回收率;  $m$  和  $n$  分别为变电站和线路的最佳使用年限;  $p_{\text{line}}$  为单位长度馈线的投资费用;  $P_{ij}$  和  $Q_{ij}$  分别为每段线路最大负荷时通过的有功功率和无功

功率; $p_e$ 为电价; $r$ 为单位线路长度的电阻; $\tau_{\max}$ 为最大负荷利用小时数。

## 2 基于加权 $K$ -means 聚类的变电站供电范围划分

### 2.1 加权 $K$ -means 聚类算法

$K$ -means 聚类算法简单,收敛速度快,可扩展且效率高,但直接使用  $K$ -means 聚类算法进行变电站供电范围划分时不能反映负荷分布不均匀、各站额定容量以及负载率不同对变电站供电范围的影响,为此提出基于加权  $K$ -means 聚类的变电站供电范围划分方法。该方法由计算各个样本间的欧氏距离改为计算加权欧式距离。

### 2.2 具体流程

(1) 针对  $n$  个初始负荷点  $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ , 随机选择  $k$  个负荷点  $(m_1, m_2, \dots, m_k)$  作为初始变电站位置。

(2) 对剩余的每个负荷点, 依次计算到各个变电站的加权距离  $d(x_i, m_j)/\omega(j)$ ,  $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, k, i \neq j$ 。 $\omega(j)$  表示变电站  $j$  权重。

$$d(x_i, m_j) = \sqrt{|x_i - m_j|^2} \quad (7)$$

(3) 找出  $x_i$  关于  $m_j$  的最小距离, 将  $x_i$  划归到  $m_j$  的供电范围。

(4) 根据划分后各变电站的供电范围, 计算新的聚类中心  $m_1^*, m_2^*, \dots, m_k^*$ , 公式为:

$$m_j^* = \frac{1}{n_j} \sum_{x_i \in M_j} x_i \quad j=1, 2, \dots, k \quad (8)$$

式(8)中: $n_j$ 为类  $M_j$  中负荷点的个数。

(5) 重新步骤(2)到(4), 直到  $m_j$  不再变化为止。

### 2.3 权重的确定

在变电站供电范围划分的过程中, 可以通过调节权重来改变每个变电站的供电范围, 权重越大, 对应变电站的供电区域越大。权重的设置需综合考虑变电站的负载率、供电半径的约束, 并且能够适应不同的负荷分布。

权重  $\omega(j)$  初始值设为 1, 根据各负荷点到各变电站的欧式距离, 将负荷分配到距离最短的变电站, 计算各变电站的第  $t$  次迭代的权重  $\omega^t(j)$ , 即:

$$\omega^t(j) = \min\{w_1^t(j), w_2^t(j)\} \quad (9)$$

$$w_1^t(j) = [S_j - l^t(j)/\cos\theta]/S_j \quad (10)$$

$$w_2^t(j) = [D - d_{\max}^t(j)]/D \quad (11)$$

式(9—11)中: $d_{\max}^t(j)$ 为在第  $t$  次迭代中变电站  $j$  的供电半径; $l^t(j)$ 为在第  $t$  次迭代中变电站  $j$  的所供负荷的有功功率。

在计算权重的过程中, 若出现权重为负或者为零的情形时, 即出现负载越限或者供电半径超出限值, 则重新选择初始变电站位置。

权重减小, 则对应变电站供电范围减小。这里考虑使用两者的较小值作为综合权重, 主要是因为考虑到进行供电范围划分时, 需同时满足变电站的负载率和供电半径的约束条件。 $\omega_1(j)$ 反映了变电站负载率的变化对权重的影响, 随着变电站所带负荷的逐步增加,  $\omega_1(j)$ 逐步减小, 变电站的扩张速度变小, 变电站的新增负荷减少。 $\omega_2(j)$ 反映了供电半径的变化对权重的影响, 随着变电站供电半径的逐步增大,  $\omega_2(j)$ 逐步变小, 变电站的扩张速度变小, 从而避免了变电站供电半径越限。

## 3 基于加权 $K$ -means 聚类 and 遗传算法的变电站规划算法

在使用加权  $K$ -means 聚类算法进行变电站供电范围划分时, 需事先明确变电站座数、主变台数和容量的组合。为此, 本文采用遗传算法对变电站的座数、主变台数和容量的选择范围内, 通过交叉变异等遗传操作, 寻求最优的变电站座数、主变台数和容量组合。

(1) 根据需要供电的总负荷容量以及容载比要求确定需要新建的变电总容量。

(2) 根据变电站的可选容量范围, 确定新建变电站座数的选择范围。110 kV 新建变电站主变容量一般为 63 MV·A, 50 MV·A, 40 MV·A, 31.5 MV·A, 主变台数一般为 2 至 3 台。变电站座数由下式确定:

$$S_{\text{new}}/(3S_{\text{max}}) \leq n_{\text{num}} \leq S_{\text{new}}/(2S_{\text{min}}) \quad (12)$$

式(12)中: $n_{\text{num}}$ 为变电站的座数; $S_{\text{new}}$ 为需要新增的变电总容量; $S_{\text{max}}$ 和  $S_{\text{min}}$ 分别为单台最大的和最小的主变容量。

(3) 根据变电站的座数范围以及对应的主变容量及台数选择范围进行混合编码。染色体的前半部分为变电站座数编码, 染色体的后半部分为对应的主变容量及台数编码。

(4) 对每一个个体采用加权  $K$ -means 聚类算法划分变电站的供电范围并确定相应的投资及运行等年值总费用。

(5) 利用精英保留策略, 对种群进行选择、分段交叉和分段变异操作, 计算适应度函数, 选择满足条件的个体进入下一代种群。

(6) 根据设定的终止条件, 判断是否结束循环, 若是则输出结果, 否则转(4)。

算法的流程如图 1 所示。

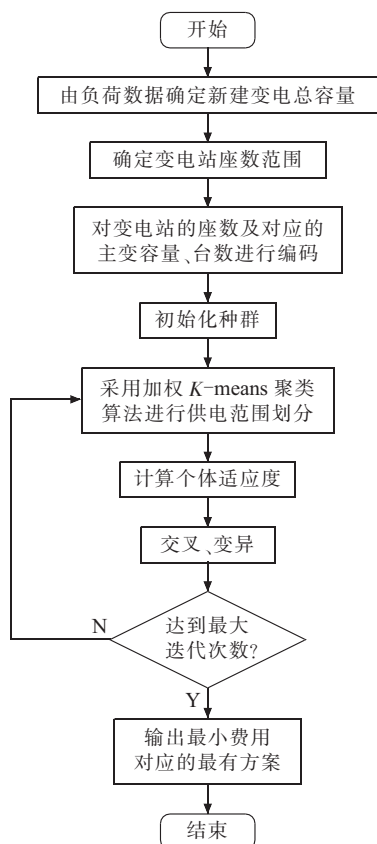


图1 算法流程图

## 4 算例分析

### 4.1 基本数据

算例以某 110 kV 规划供电区域为例,该规划区域共有 156 个负荷节点,总负荷为 238.38 MW,具体负荷大小和位置信息参见文献[14]。变电站主变容量有 63 MV·A, 50 MV·A, 40 MV·A, 31.5 MV·A 可供选择,主变台数可取 2 至 3 台。根据配电网规划导则,110 kV 电网容载比取 1.8~2.2。功率因数取 0.9,负荷同时率取 0.85。遗传算法的基本参数设置:种群规模 100,迭代次数 100,交叉概率为 0.9,变异概率为 0.1。

变电站的固定投资为 1800 万元/座,单位容量投资费用为 24 万元/MV·A,单位容量年运行费用为 5.6 万元/MV·A,折旧年限为 30 a。线路采用 JKLYJ-150,单位长度投资费用为 25 万元/km,折旧年限为 20 a。最大负荷利用小时数为 4000 h,贴现率为 0.08。变电站主变为 2 台时,最大负载率为 65%,3 台时最大负载率为 87%。最大供电半径取 3 km。

### 4.2 算例结果及分析

采用本文方法的规划结果如图 2 所示。一共建设 4 座变电站,分别为 1 座 3×40 MV·A、1 座 2·50 MV·A 和 2 座 2×40 MV·A。负载率分别为 68.2%, 55.7%, 54.3%, 55.2%, 等年值总费用为 3 918.5 万元。与文献[14]相比,在不考虑行政边界影响的情况下,文献[14]

的规划结果为新建 4 座 2×50 MV·A 的变电站,等年值总费用为 4 185.9 万元。本文的规划方案比文献[14]相比少建了 20 MV·A 的变电容量,这主要是因为本文采用遗传算法可以获取最优的变电站座数、主变台数和容量组合。

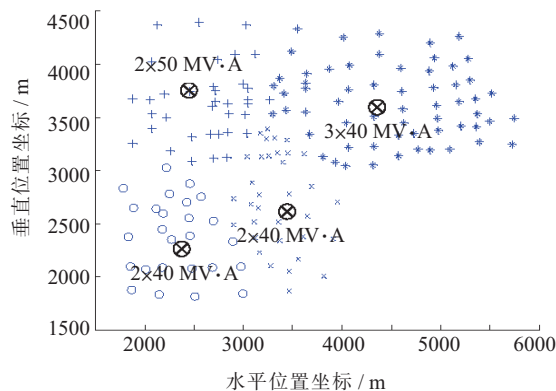


图2 规划结果

求解过程中的收敛情况如图 3 所示,可以看出遗传算法与加权  $K$ -means 聚类算法相结合求解变电站规划问题时,结果可以快速收敛。

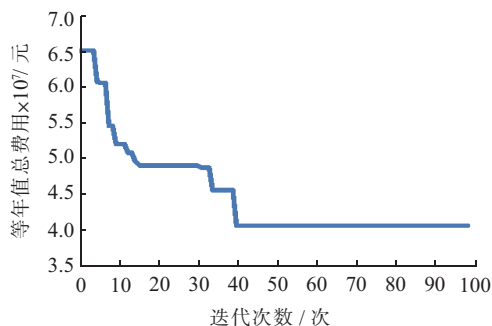


图3 算法适应度函数的收敛曲线

## 5 结束语

本文建立了变电站优化规划的数学模型,提出了基于加权  $K$ -means 聚类的变电站供电范围划分方法,并在此基础上提出了基于加权  $K$ -means 聚类和遗传算法的变电站规划算法。本文提出的基于加权  $K$ -means 聚类和遗传算法的变电站规划算法具有以下特点:

(1) 变电站的座数、主变台数和容量不需要事先确定,而是运用遗传算法的全局搜索能力确定最优的组合。

(2) 加权  $K$ -means 聚类算法能够综合考虑变电站的负载率和供电半径的约束,并在迭代过程中自适应调节。

算例结果表明本文提出的基于加权  $K$ -means 聚类和遗传算法的变电站规划算法能够较好地求解变电站优化规划模型,对实际的变电站规划工作具有一定的指导作用。

## 参考文献:

- [1] 程浩忠,陈章潮. 城市电网规划与改造(第三版)[M]. 北京:中国电力出版社,2015:124-126.
- [2] TEMRAZ H K, SALAMA M M A. A Planning Model for Sitting, Sizing and Timing of Distribution Substations and Defining the Associated Service Area [J]. Electric Power System Research, 2002, 62(6):145-151.
- [3] JALALI M, ZARE K, HAGH M T. Dynamic Expansion Planning of Sub-transmission Substation and Defining the Associate Service Area [J]. Electric Power System Research, 2014, 116 (3):218-230.
- [4] 张崇见,余贻鑫,严雪飞. 中压配电变压器优化规划[J]. 电力系统自动化,1999,23(1):27-30.
- [5] DAI H W, YU Y X, HUANG C H, et al. Optimal Planning of Distribution Substation Location and Sizes-model and Algorithm [J]. Electrical Power and Energy Systems, 1996, 18(6):353-357.
- [6] 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.
- [7] 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):106-111.
- [8] 牛卫平,刘自发,张建华. 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):82-86.
- [9] 李燕青,谢庆,王岭云,等. 云理论在配电网变电站选址定容中的应用[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):672-677.
- [10] 王玉瑾,王主丁,张宗益,等. 基于初始站址冗余网格动态减少的变电站规划[J]. 电力系统自动化,2010,34(12):39-43.
- [11] 葛少云,贾鸥莎. 配电变电站多阶段优化规划模型[J]. 电网技术,2012,36(10):113-118.
- [12] 葛少云,李慧,刘洪,等. 基于加权 Voronoi 图的变电站优化规划[J]. 电力系统自动化,2007,31(3):29-34.
- [13] 曹昉,孟琦斌,苗培青,等. 基于改进加权 Voronoi 图和遗传算法的变电站规划[J]. 电网技术,2015,39(2):511-516.
- [14] 符杨,卫春峰,李振坤,等. 考虑地理信息和行政边界的变电站供区优化[J]. 电网技术,2014,38(1):126-131.
- [15] 韩俊,谈健,黄河,等. 基于改进 K-means 聚类算法的供电块划分方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(6):123-129.
- [16] 路志英,葛少云,王成山. 基于粒子群优化的加权伏罗诺伊图变电站规划[J]. 中国电机工程学报,2009,29(16):35-41.
- [17] 赵莉,侯兴哲,胡君,等. 基于改进 K-means 算法的海量智能用电数据分析[J]. 电网技术,2013,38(10):2715-2720.
- [18] 刘莉,王刚,翟登辉. K-means 聚类算法在负荷曲线分类中的应用[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(23):65-73.
- [19] 颜庆国,薛溟枫,范洁,等. 有序用电用户负荷特性分析方法研究[J]. 江苏电机工程,2014,33(6):48-50,54.

## 作者简介:

成乐祥(1984),男,江苏南京人,工程师,从事配电网规划、配电网自动化规划工作;

季丽(1986),女,江苏张家港人,中级会计师,从事电力企业管理工作。

## Substation Planning Based on Weighted K-means Cluster Algorithm and Genetic Algorithm

CHENG Lexiang<sup>1</sup>, JI Li<sup>2</sup>

(1.State Grid Nanjing Power Supply Company, Nanjing 210019, Jiangsu Province, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Company Electric Power Research Institute, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** The paper proposed a partitioning method of substation service areas based on weighted K-means clustering algorithm, based on which substation planning algorithm was put forward further with genetic algorithm. The algorithm determines the optimal combination of the number of substations and main transformers and the capacity of main transformer by the global searching ability of genetic algorithm, which solves the problem of determining initial clustering number when partitioning substation service areas by weighted K-means clustering algorithm. The weighted K-means clustering algorithm can comprehensively meet the constraints of load ratio and supply radius of substation and take adaptive adjustment during iteration. The example shows that the proposed algorithm can serve for substation planning well.

**Key words:** substation planning; weighted K-means cluster algorithm; genetic algorithm; substation location; optimal partitioning of service areas

### 下 期 要 目

- 分频输电在海上风电并网应用中的前景和挑战
- 大规模光伏发电并网概率潮流计算及对电网的影响分析

- 面向 AGC 的变速变桨风电机组有功功率控制策略综述
- 电压源型换流阀在绝缘型式试验下电场仿真计算