

基于 Voronoi 图的变电站选址方法

关洪浩, 唐巍

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 由于 Voronoi 图在规划选址中具有独特优势, 充分利用 V 图的特性并结合变电站站址的选取原则来指导新建站址的选择。对 V 图的定义、性质及 V 图的对偶图 Delaunay 三角剖分进行了简单的介绍, 对生成 Delaunay 三角剖分及 V 图的 Lawson 算法进行了详细的阐述。对于新建站址的选择, 以现有变电站为基础, 将 V 图应用于负荷均匀分布和非均匀分布两种情况并对负荷非均匀分布下新建站址选择的交替迭代方法进行了实例仿真。规划结果表明该选址方法能有效地解决新建变电站的位置选择问题。

关键词: 变电站选址; Voronoi 图; Delaunay 三角剖分; 交替定位

Substation location method based on Voronoi diagram

GUAN Hong-hao, TANG Wei

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Voronoi diagram has a unique superiority in planning and site selection. This paper uses Voronoi diagram to guide the location of new substations by considering the principle of the substation location. The definition and characteristics of Voronoi diagram and its dual structure Delaunay triangulation are introduced simply. The Lawson algorithm for generating Delaunay triangulations is also described in detail. In the new substation location section, this paper proposes substation location with even and uneven load distribution using Voronoi diagram. The alternating iteration algorithm for uneven load distribution is simulated through an actual location problem. The outcome shows the feasibility and effectiveness of the proposed method in new substation location.

Key words: substation location; Voronoi diagram; Delaunay triangulation; alternate location

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)20-0196-05

0 引言

变电站选址是电力系统规划的重要环节, 变电站位置选取适当对电网结构, 供电可靠性, 运行的经济性以及供电质量有重要的意义。因此科学合理的选址方法能够极大地提高规划的准确性和实用性。但由于选址问题涉及到的地理因素及其他不确定因素较多, 很难建立一种通用的数学模型来考虑各个因素的影响。

变电站选址问题主要分给定候选站址和未给定候选站址的选址。给定候选站址的选址问题比较简单, 通常是根椐一系列评价指标评分后选出最优的站址组合, 如文献[1]采用模糊层次分析法对各个站址进行评估选出相对较优的站址。文献[2]采用模糊识别理论辅助站址的选择。未给定候选站址的选址方法通常是对负荷进行聚类, 采用交替定位求多个聚类中心, 最后求出最优的站址。如文献[3]将遗传

算法和交替算法相结合, 最终确定变电站的站址和容量。文献[4]采用改进粒子群算法进行站址的选择, 同时将地理信息考虑到模型中, 避免不可行站址的产生。

由于负荷聚类方法无法考虑现有的变电站的作用, 因此不可避免出现新建站址和原有站址重叠的情况。此外, 很多聚类方法的结果和初始聚类中心的位置选取有关, 因此最后得到的聚类中心的位置可能并不唯一。Voronoi 图(简称 V 图)是一种特殊几何结构的多边形; 其所具有的空间最邻近特性和空心圆特性适合规划选址问题。本文充分利用 V 图的特性并结合变电站选址原则指导新建站址的选择。文章首先对 V 图的定义、性质及 V 图的对偶图 Delaunay 三角剖分进行了简单的介绍, 对生成 Delaunay 三角剖分及 V 图的 Lawson 算法进行了详细的阐述。对于新建站址的选择, 本文以现有变电站为基础, 将 V 图应用于负荷均匀分布和非均匀分

布两种情况下新建站址的选择并对负荷非均匀分布的交替迭代方法进行了实例仿真。规划结果表明该规划方法能有效解决实际站址的选择问题。

1 新建站址的选取原则

合理的变电站布局不仅可以节省投资,而且可以极大地降低电网损耗,提高运行管理水平,具有高度的灵活性。在解决新增变电站的定位和各变电站最佳供电区域划分问题时,应遵循以下主要原则。

(1) 靠近负荷中心

在规划区负荷分布确定的情况下,新建站址的选取应尽可能靠近负荷中心,以便减少电网的投资和网络损耗,提高电网运行的经济性。

(2) 合理的网络结构

新建站址的选择要满足网络长期最优发展和变电站合理分布的要求。各个变电站之间必须保持一定的距离,以避免距离过近造成供电范围重叠。

(3) 合理的供电半径

各变电站都具有一个合理的供电半径,其供电范围的大小与变电站主变容量相关。新建站址的选取必须考虑已有站址的容量大小关系。在综合考虑各相关因素后变电站的供电半径应在满足主变不过载、线路电压降小于 10% 的约束下确定,一般可采用负荷矩来度量。

(4) 主变容量必须满足容载比要求

在对已有站和新建站的供电范围进行重新划分之后,已有站和新建站的主变容量必须能满足该变电站负荷分区内负荷容载比要求。

2 Voronoi 图的基本描述

平面上的 V 图^[5]可以看作是点集 P 中每个顶点 P_i ($i=1, 2, \dots, n$) 以相同的速度向外扩张,直到彼此相遇为止而在平面上形成的图形;这样,除最外层的点形成开放的区域外,其余每个点都形成凸多边形。这一描述与配变的定位及供电区域的划分具有极大的相似性。

2.1 Voronoi 图的基本定义

假设 $p = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, $3 < n < \infty$ 是欧几里德平面上的一个点集,这些点互不相同,即 $p_i \neq p_j, i \neq j, i, j \in I_n \{1, 2, \dots, n\}$, 用 $d(p_i, p_j)$ 表示点 p_i 与 p_j 间的欧几里德距离。假设 x 为平面上的点,则区域: $V_{(i)} = \{x \in E^2 \mid d(x, p_i) < d(x, p_j), j = 1, 2, \dots, n, j \neq i\}$ 称为 Voronoi 多边形 (V 多边形), 记为 $V(p_i)$; 各点的 V 多边形可以共同组成最近点意义下的 V 图。图 1 为在给定点 P_1, P_2, \dots, P_{12}

下生成的 V 多边形。

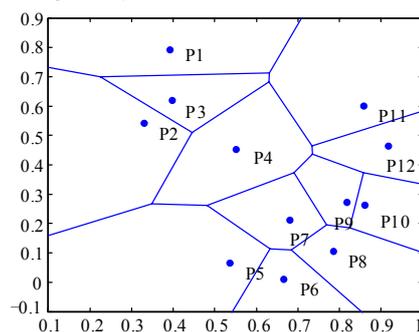


图 1 Voronoi 图示例

Fig.1 Voronoi diagram example

2.2 Voronoi 图的相关性质

(1) 最邻近特性

每一个空间顶点唯一地对应一个 V 多边形。相对于其他顶点来说,凡落在其 V 多边形内的任一空间点与本顶点的距离为最小。应用 V 多边形的这一性质,每个站址的供电区域可以唯一地对应一个 V 多边形;凡是在 V 多边形以内的电力负荷至站址的空间距离均是最近的。

(2) 空圆特性

每个 V 图顶点恰好是三条 V 图边的交点(假如任何四点都不共圆)。也就是说 V 图顶点就是形成三边的三点的外接圆圆心,而且所有的这些外接圆有个特点:各自内部不含任何给定的点,具有空心特性。如果未来要新建站址,空圆半径越大的 V 图顶点其新建的可能性越大。

2.3 V 图的生成方法

V 图的生成方法很多,常见的生成方法有半平面法、增量法、分治法、并行法和间接法。前四种属于直接法,根据已知顶点直接生成 V 图;而间接法是先生成 V 图的对偶 Delaunay 三角剖分,再生成 V 图。本文采用间接法生成 V 图,这里首先介绍一下三角剖分问题。

3 三角剖分

所谓三角剖分即是把一个散点集合剖分成不均匀的三角形网格,其完整的数学定义如下。

假设 V 是二维实数域上的有限点集,边 e 是由点集中的点作为端点构成的封闭线段, E 为 e 的集合。那么该点集 V 的一个三角剖分 $T = (V, E)$ 是一个平面图 G , 该平面图满足条件:

(1) 除了端点,平面图中的边不包含点集中的任何点。

(2) 没有相交边。

(3) 平面图中所有的面都是三角面，且所有三角面的合集是散点集 V 的凸包。

图 2 便是给定散点图的一种三角剖分。

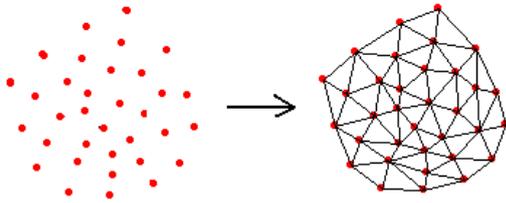


图 2 散点图的三角剖分
Fig.2 Discrete points' triangulation

在实际中运用的最多的三角剖分是 Delaunay 三角剖分，它是一种特殊的三角剖分。其定义如下。

假设 E 中的一条边 e (两个端点为 a, b)， e 若满足下列条件，则称之为 Delaunay 边：存在一个圆经过 a, b 两点，圆内 (注意是圆内，圆上最多三点共圆) 不含点集 V 中任何其他的点。

3.1 Delaunay 三角剖分特性

(1) 空圆特性

Delaunay 三角网是唯一的 (任意四点不能共圆)，在 Delaunay 三角形网中任一三角形的外接圆范围内不会有其他点存在。

(2) 最大化最小角特性

Delaunay 三角剖分所形成的三角形的最小角最大。从这个意义上讲，Delaunay 三角网是“最接近于规则化”的三角网。具体的说是指在两个相邻的三角形构成凸四边形的对角线，在相互交换后，六个内角的最小角不再增大。如图 3 所示。

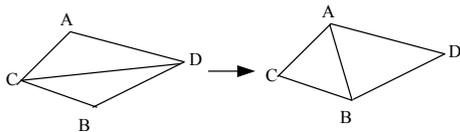


图 3 最小角最大化
Fig.3 Minimum angle maximization

3.2 Delaunay三角剖分算法

Delaunay 三角剖分^[6-7]可以采用 Lawson 算法。该算法思路简单，易于编程实现。基本原理为：首先建立一个大的三角形，把所有数据点包围起来，向其中插入一点，该点与包含它的三角形三个顶点相连，形成三个新的三角形，然后逐个对它们进行空外接圆检测，同时用 Lawson 设计的局部优化过程 LOP 进行优化，即通过交换对角线的方法来保证所形成的三角网为 Delaunay 三角网。局部优化的过程如图 4 所示。

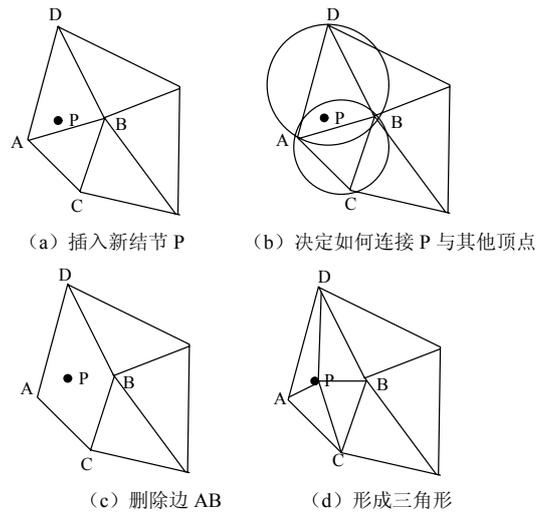


图 4 Delaunay 三角网的局部优化
Fig.4 Local optimization of Delaunay triangulation

图 4 (a) 已经形成了 Delaunay 三角网，现在点 P 添加后该三角网需要重新进行划分。根据图 4 (b)， P 点只在三角形 ABD 和三角形 ABC 所形成的两个三角形的外接圆中，因此只需要对这两个三角形所在的范围进行修正就可以了。具体方法是断开公共边 AB ，然后将其他各点与 P 点相连即可。这样就能保证新的三角网中各个三角形的外接圆不包括任意给定点。

V 图的生成则只需要找出所有 Delaunay 三角剖分中的三角形的外接圆的圆心，再根据三角形的相邻关系，连接对应的圆心即可。

4 新建站址的选择方法

4.1 负荷均匀分布下的选址方法

负荷均匀分布下的选址主要是从已有站的位置确定新建站的位置，以满足最优的变电站布局。具体选址方法是首先根据已有的站址生成 V 图，根据 V 图顶点所在的空心圆半径按从大到小的顺序排序，预设一个相邻站址的最小距离约束。然后按照顺序逐点添加，并判断是否满足最小距离约束，若不满足则转下一个点，直到新建站址数量达到预定要求为止。

上述选址方法完全从负荷均匀的情况考虑，新建站址从地理位置上看是合理的。但由于考虑实际因素少，结果不一定最优。

4.2 负荷非均匀分布下的交替定位选址方法

由于实际负荷分布不可能均匀，利用 4.1 节所述的方法选取新建站址就可能偏离负荷中心，选址不再最优。这时可以根据已有的负荷分布对新建站址位置进行调整。具体调整规则如下：

(1) 采用 Lawson 算法生成 Delaunay 三角网,再生成 V 图。对 V 图中每个顶点对应的空心圆中所包围的负荷点求和。将其负荷总数与空心圆上交的已建的三个变电站容量的 1/3 分别作差,并按其差额从大到小进行排序,差额越大,说明该处的容量缺额就越大。然后根据要新建的站址的数量以及相邻站址的最小距离约束选取排在前面的几个外接圆,其外接圆的圆心作为初始站址。

(2) 根据已有的站址和新建站址重新生成 V 图,确定新建变电站的最优供电范围。根据待新建变电站的所带的负荷求出负荷重心,并将待建站的站址调整为负荷重心的位置。

(3) 重复 (2),直到新建站址的位置变化小于一定的预设精度为止。

具体的流程图如图 5 所示。

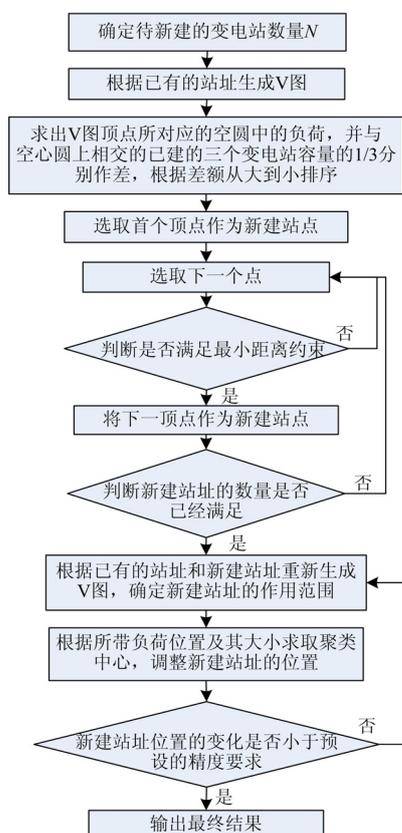


图 5 考虑负荷分布下的站址选择流程

Fig.5 Flow chart considering uneven load distribution

5 算例

本文利用上述的规划方法对一县区进行远景规划。该区域未来的负荷点有 160 点,目前已有 11 座 35 kV 的变电站。根据负荷预测结果,预计未来需新建的 35 kV 变电站数量为 3 个,相邻站址的最小距离设为 10 km,要确定新建站址的最优位置。

图 6 为待规划区的具体情况。

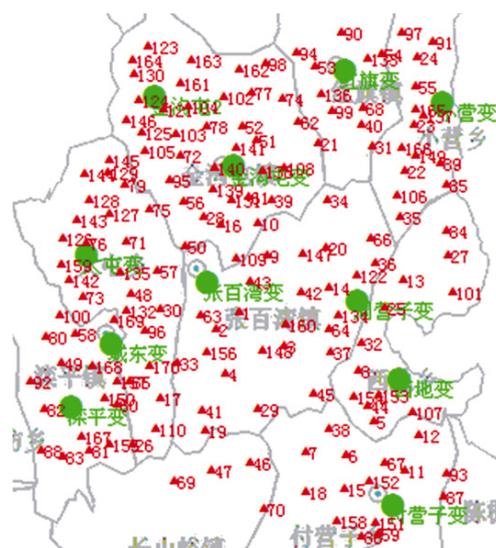


图 6 原有规划区情况

Fig.6 Situation of pre-planning area

利用已有的站址生成 Delaunay 三角剖分,然后生成 V 图。根据相邻站址最小距离约束和空圆负荷缺额大小找出的三个初始站址如图 7 所示。

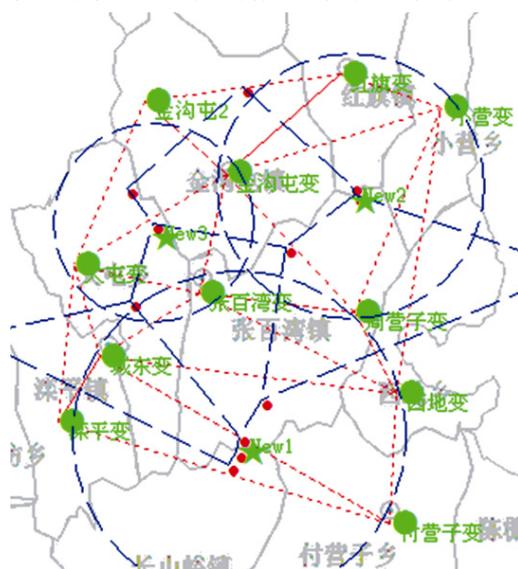


图 7 利用 V 图生成初始站址

Fig.7 Initial generated sites using Voronoi diagram

在形成初始站址后,利用已有站址和新建站址重新生成 V 图,确定新建站址的作用范围。然后根据其所带负荷位置和大小求出负荷中心并调整新建站址的位置。这样反复迭代最后得到的最终站址位置如图 8 所示。

