

# 一种基于改进最小生成树算法的 GIS 配电网架优化规划方法

陈勇<sup>1</sup>, 于家河<sup>2</sup>, 谭家茂<sup>3</sup>, 张存良<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640; 2. 广东省电力学校, 广东 广州 510520;

3. 广东火电工程总公司, 广东 广州 510730)

**摘要:** 配电网架优化规划方法是基于 GIS 的配电网规划工作的重要组成部分。图论是研究图的组合关系及结构的一个数学分支, 可以方便地实现图形同计算机算法的结合。因此, 采用图论中的重要理论——最小生成树算法作为 GIS 软件处理配电网架优化规划问题的基本方法。阐述了从配电网架优化规划论域转化到加权图的一些处理措施, 提出了一种采用基于限定主干网架线路的改进最小生成树算法的配电网架优化规划方法。

**关键词:** 配电网规划; 地理信息系统; 最小生成树

## A distribution network optimal planning algorithm based on improved minimum-cost spanning tree on GIS

CHEN Yong<sup>1</sup>, YU Jia-he<sup>2</sup>, TAN Jia-mao<sup>3</sup>, ZHANG Cuo-liang<sup>2</sup>

(1. Electrical Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Electric Power School of Guangdong, Guangzhou 510520, China; 3. Guangdong Power Engineering Corporation, Guangzhou 510730, China)

**Abstract:** The network structure optimizing planning (NSOP) method of distribution network is an important part of the planning work based on GIS. As a mathematic branch of studying the graphical composite relation and fabric, the graph theory can be expediently used in solving graphical problem with computing algorithm. This paper adopts minimum-cost spanning tree (MCST) algorithm, which is an important branch of the graph theory, as the basic approach of NSOP problems by GIS. After introducing some treating measures from NSOP domain to weighted graph, this paper puts forward a new method of NSOP, which uses the improved MCST algorithm that the main network structure is limited.

**Key words:** distribution network planning; geographic information system; minimum-cost spanning tree

中图分类号: TM715

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2007)19-0022-05

## 0 引言

配电网架优化规划方法是基于 GIS 的配电网规划工作的重要组成部分。国内外在配电网架规划方面已经开展了大量卓有成效的研究: 文献[1]以总体负荷矩最小为目标函数, 提出了两层改进的遗传算法与一层最短路算法相互嵌套的算法进行配电网综合规划; 文献[2]和[3]采用改进最小生成树方法进行配电网架规划, 具有较高的计算效率; 文献[4]将 GIS 应用于配电网智能规划; 文献[5]将 GIS 和 Tabu 算法相结合进行配电网规划。

图论的最小生成树理论发展比较成熟, 随着计算机处理的应用, 使得该理论对处理很多有关实际问题有很大帮助。尤其对应于基于 GIS 中的配电网架, 图论算法有很大的优越性, 它在网络结构拓扑、网络数学建模、馈线分析以及网络结构变化的再处理等方面具有很强的适应性。本文注意到图论中的

最小生成树理论对配电网架优化规划问题具有的长处和启发性, 采用该理论作为网架优化规划算法的基础, 结合 GIS 系统强大的数据读取、分析、处理能力, 提出了一种采用限定主干网架线路的改进最小生成树算法的配电网架优化规划方法。

## 1 改进最小生成树算法

配电网架优化规划的任务是在已确定配电网中供电变电站的布点及其供电范围、负荷分布及其大小的情况下, 求得配电线路的拓扑结构和导线规范, 使网架在保证供电质量的同时, 投资和运行费用总和最小。本文将电源点、线路交叉点和负荷点作为图的节点, 节点间可能的连线作为边, 线路投资和运行线损等作为边的权重, 那么配电网架优化规划就转化为求图的最小生成树问题。

### 1.1 规划图的预处理

#### 1.1.1 供电中区划分

《城市中低压配电网改造技术导则》对配电网网架规划提出了一定要求: 城市中压配电网应根据高压变电所布点、负荷密度和运行管理的需要划分成若干个相对独立的分区配电网。分区配电网应有较为明显的供电范围, 一般不应交错重叠。分区的划分要随着情况的变化适时调整。

根据以上要求, 规划人员一般要划分供电中区。所谓中区, 是指以现状和规划的主要路网、水系等为界, 综合考虑负荷的大小、类型等情况, 将变电站供电范围划分成若干较小的分区。

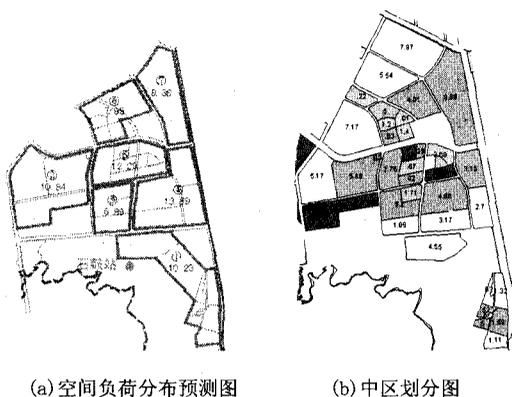


图 1 石鼓站 2008 年中区划分示例 (单位: MW)

Fig.1 Dividing median zone example of Shigu substation in 2008 (Unit: MW)

以石鼓站为例, 其 2008 年的空间负荷分布预测结果如图 1(a)所示, 对应的中区划分如图 1(b)所示。

### 1.1.2 对一些图元的概念进行定义

为了采用最小生成树算法时叙述方便, 本文先对一些概念进行定义: ①将规划区域内的电源点(即变电站中心点)和负荷点(中区负荷中心点)当作图的顶点; ②将可能架设线路走廊的交叉处称为交叉点, 将顶点和交叉点统称为节点, 将各个节点间可能架设线路的走廊称作路径, 将以顶点为端点的路径当作图的边; ③将各条路径和边上线路的建设费用(包括线路材料费用和施工费用)和运行费用(主要为线损)之和分别作为各条路径和边的权。这样就将配电网规划论域转化为一个加权图  $G=(V, E, \omega)$ , 其中  $V$ 、 $E$  和  $\omega$  分别表示图中所有顶点、边的集合和边的权的集合。

### 1.2 配电网架优化规划的改进最小生成树算法

完成以上预处理工作后, 就可以采用 Prim 算法或 Kruskal 算法进行配电网网架优化规划<sup>[2,3]</sup>。但是对于配电网网架优化规划来说, 需要考虑的目标和约束条件很多, 直接运用此两种方法求解, 得到的结果还不够理想, 离实际规划要求还有一定的距离。

因此, 必须在最小生成树算法的应用过程中做一些实际处理的改进, 才能适用于配电网网架优化规划要求。

#### 1.2.1 节点的处理

由上节定义可知, 节点包括电源点、负荷点和线路走廊交叉点。为了计算处理方便, 在此先将所有节点都抽象为一般意义上的顶点, 不作区分。待所有顶点都连接到最小生成树上后, 再选取连通电源点和负荷点的树枝作为线路, 或者采用“剪枝最小生成树算法”, 删去以交叉点为末梢的分支路径, 剩下的树就是连通电源点和负荷点的线路。

#### 1.2.2 线路走廊约束处理

配电网网络结构包括主干网架和分支网络, 这些主干和分支的线路走廊应该依据市政规划中的路网规划来选择。在实际的规划过程中, 供电部门对配网主干线路走廊一般都有初步设想或者甚至有明确的线路走径预案。因此, 如果不加约束的采用最小生成树算法, 得到的结果很难满足供电部门的要求。为此本文将已经确定的  $m$  条主干线路走廊所经过的边事先放入  $T$  中, 然后对每条主干线路走廊对应的顶点(包含除电源点外的线路走廊经过的边的顶点和该线路走廊的供电范围内的其它顶点)和边进行分组, 设置为顶点集合  $V_1, V_2, \dots, V_m$ , 边集合  $E_1, E_2, \dots, E_m$ 。对于图  $G=(V, E, \omega)$ , 设电源点为  $v_1$ , 则  $\{v_1\} \cup V_1 \cup V_2 \cup \dots \cup V_m = V$ 。

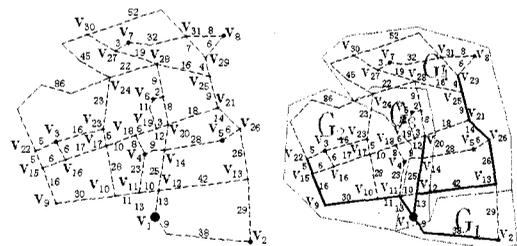


图 2 加权图及其子图示例 (权值单位: 万元)

Fig.2 Weighted graph and the example of its subgraph (Weighted unit: wan yuan)

分别求取子图  $G_j=(V_j, E_j, \omega_j)$  ( $j=1, 2, \dots, m$ ) 的最小生成树, 就可以得到以确定线路走廊为约束条件的最优网架结构。

图 2(a)是图 1 所示 2008 年石鼓站配电网规划图转化得到的加权图。图(a)中顶点  $V_1$  表示电源点,  $V_2$  至  $V_8$  表示图 1 中的 7 个负荷点,  $V_9$  至  $V_{31}$  表示交叉点。

图 2(a)上确定 4 条限定的主干线路走廊(粗实

线部分), 对应地划分 4 个子图  $G_1$ 、 $G_2$ 、 $G_3$  和  $G_4$ , 如图 2(b)所示。

1.2.3 权值计算处理

边的权值  $\omega_i$  是指第  $i$  条边上线路的建设费用  $f_i$  (包括线路材料费用和施工费用) 和运行费用  $l_i$  (主要为线损) 之和, 即

$$\omega_i = f_i + l_i \quad (1)$$

式(1)中  $f_i$  一般按照供电部门提供的单位工程造价计算得到,  $l_i$  计算公式如(2):

$$l_i = 3k_i I_i^2 R_i \quad (2)$$

式中:  $k_i$  为线损的费用系数。

近似地认为沿线电压变化不大且所有负荷的功率因素相等, 计算第  $i$  条上的电流  $I_i$  的公式如(3):

$$I_i = \frac{P_i}{\sqrt{3}U_N \cos \varphi} \quad (3)$$

$$R_i = \rho L_i / \alpha_i \quad (4)$$

式(3)和(4)中:  $P_i$  为第  $i$  条边上输送的功率,  $U_N$  为配电网额定电压,  $\cos \varphi$  为功率因素,  $\rho$  为电阻率,  $L_i$  为第  $i$  条边的长度,  $\alpha_i$  为第  $i$  条边的导线截面积。

根据 10 kV 配电网线路的单位工程造价, 2008 年石鼓站配电网规划图转化的单回线路的权值计算结果如图 2(a)所示。

在求取最小生成树的计算过程中, 采用文献[2]和文献[3]提供的方法, 边的权值是不断变化的, 需要反复的修改和迭代, 增加了计算的复杂程度和延缓了计算的收敛速度。为克服这一缺陷, 本文在划分子图的基础上直接修改边的权值, 从而得到最终的加权图, 具体方法如下:

在划分子图后, 由于每一负荷点都只能从对应的主干线路获取电源, 也就是说功率的流向是由主干线路沿着某些可能的线路到达负荷点, 因此对应于每一子图, 可以采用“先末梢后主干、由远及近(树根)”的方法逐步修改边的权值。

例如, 负荷中心点  $V_8$  采用两回线路供电, 则与  $V_8$  相连的边以及由  $V_8$  出发位于子图  $G_4$  内连通至主干的边的权值均乘以 2, 详见图 3。

对于主干线路, 将边的权值  $\omega_i$  的计算公式(1)修改为:

$$\omega_i = f_i + l_i + g_i \quad (5)$$

式中:  $g_i$  为第  $i$  条边主干电缆管道或架空杆架建设

费用。

图 3 给出了图 2(b)的权值修改结果。

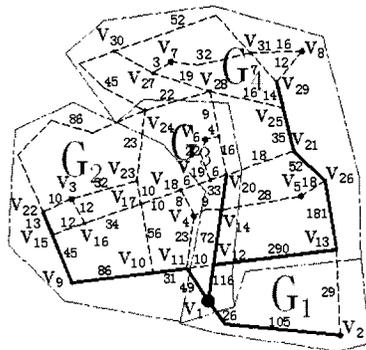


图 3 图 2(b) 权值修改结果 (权值单位: 万元)

Fig.3 The modified weight result of Fig.2 (b) (weighted unit: wan yuan)

经过这样的处理, 在运用最小生成树算法时, 不必再修改边的权值, 避免了文献[2]和文献[3]中繁琐的、不断修改边的权值的迭代过程, 极大地提高了计算效率。

1.2.4 改进的最小生成树算法

本文在分析 GIS 系统中配电网规划特点的基础上, 结合前面的预处理和实际改进措施, 提出一种改进的最小生成树算法。

设  $G = (V, E, \omega)$  是配电网规划论域转化而来的一个加权图, 则求取改进最小生成树的具体步骤如下:

Step1 初始化:

①设置初始顶点集合  $V$ 、边集合  $E$  和集合初值  $T = V$ 。

②设置各条边的权值  $\omega_i$ 。

Step2 确定的  $m$  条主干线路走廊所经过的边, 并放入  $T$ 。分组每条主干线路走廊对应的顶点集合  $V_1, V_2, \dots, V_m$ , 边集合  $E_1, E_2, \dots, E_m$ ,  $T$  也对应分解为  $T_1, T_2, \dots, T_m$ , 得到子图  $G_j = (V_j, E_j, \omega_j)$  ( $j=1,2,\dots, m$ )。设置初值  $j=1$ 。

Step3 执行求取子图  $G_j = (V_j, E_j, \omega_j)$  最小生成树的子程序。子程序采用 Prim 算法或 Kruskal 算法。

Step4 若  $j = m$ , 得到图  $G = (V, E, \omega)$  的最小生成树, 转 Step5; 否则令  $j = j + 1$ , 转 Step3。

Step5 执行剪枝子程序, 删除以交叉点为末梢的树枝。

所谓末梢顶点, 就是指该顶点处于树枝的末端, 只有唯一的一条有权边同它相连。

Step6 得到满足约束条件的电源点和负荷点间的最小生成树, 结束。

至此, 所有的负荷点都已连接到电源点上, 优化规划结束。

### 1.3 求最小生成树的子程序(以 Kruskal 算法为例)

Kruskal 算法又称为避圈法。将图的所有边按其权值由小到大排列。从最短边开始, 依次考察各边, 连到树上不会形成回路, 便加入该树, 否则考察下一条边。

Kruskal 算法的数学描述如下:

设  $G$  是赋权连通  $(n, m)$  图, 已知  $G$  的边。求  $G$  的最小生成树的避圈法的详细步骤如下:

Step1 把  $G$  的边按权的大小顺序排列, 即要求  $\omega(e_1) \leq \omega(e_2) \leq \dots \leq \omega(e_m)$ 。令  $T = V(G)$ ,  $l(v_j) = j, j = 1, 2, \dots, n, k = 1, i = 0$ 。

Step2 设  $e_k = (u, v)$ , 若  $l(u) = l(v)$  (注:  $l(u) = l(v) \Leftrightarrow T + e_k$  含圈) 转 Step5; 否则令  $T = T + e_k, i = i + 1$ 。

Step3 对一切满足  $l(v_j) = \max\{l(u), l(v)\}$  的  $v_j$ , 令  $l(v_j) = \min\{l(u), l(v)\}$ 。

Step4 若  $i = n - 1, T$  是最小生成树, 停。

Step5 令  $k = k + 1$ , 转 Step2。

### 1.4 剪枝子程序

第一步, 初始化。

① 设置两个顶点集合  $S, D$  和  $F$ , 集合  $D$  存放负荷点和电源点, 集合  $S = V - D$  (即集合  $S$  存放所有交叉点), 置集合初值  $F = \Phi$ 。  
 $l(u) = l(v) = 0$ 。

② 设图  $G = (V, E, \omega)$  的最小生成树有  $M$  条边, 将边表示为  $e_k = (u, v)$ , 其中  $u, v$  为边  $e_k$  的顶点, 对应的权值为  $\omega(e_k)$ 。把最小生成树的边按权值重新排序, 即要求  $\omega(e_1) \leq \omega(e_2) \leq \dots \leq \omega(e_M)$ 。令  $k = 1$ 。

③ 设图  $G = (V, E, \omega)$  的最小生成树有  $N$  个交叉点, 对它们重新排序为  $v_1, v_2, \dots, v_N$ 。设置初值  $I = 1$ 。

第二步, 搜索边  $e_k = (u, v)$ 。令  $l(u) = l(u) + 1, l(v) = l(v) + 1$ 。

第三步, 若  $k = M$ , 转第四步; 否则,  $k = k + 1$ , 转第二步。

第四步, 搜索所有交叉点  $v_i, v_i \in S$ 。若  $l(v_i) = 1, F = F \cup \{v_i\}$ 。

第五步, 若  $I = N$ , 且  $F = \Phi$ , 停, 剪枝完毕, 转 Step6; 若  $I = N, F \neq \Phi$ , 转第六步; 若  $I < N, I = I + 1$ , 转第四步。

第六步, 设  $F$  中放入了  $L$  个交叉顶点, 对它们重新排序为  $v_1, v_2, \dots, v_L$ 。设  $J = 1$ 。

第七步, 搜索  $F$  中交叉点  $v_j$ , 即  $v_j \in S$ 。删除  $v_j$  和边  $e_k = (u, v_j), F = F \cap \{\bar{v}_j\}$ 。

第八步, 若  $F = \Phi$ , 转第二步; 否则,  $J = J + 1$ , 转第七步。

## 2 算例分析

本文前述改进最小生成树算法, 应用于东莞塘厦配电网架优化规划, 取得了较好的效果, 得到了供电部门的肯定。现以规划年 2008 年石鼓站网架优化规划为例, 来加以说明。

图 1 已经给出了 2008 年石鼓站的中区划分, 图 2 给出了经过处理和转化的加权图及其子图, 图 3 得到了权值经过修改的加权图。在 GIS 系统中采用改进最小生成树算法, 图 3 经程序处理, 得到限定主干线路走廊的最小生成树, 如图 4 所示。图 4 中粗实线表示限定的主干线路, 细实线表示采用计算选定的线路走廊。

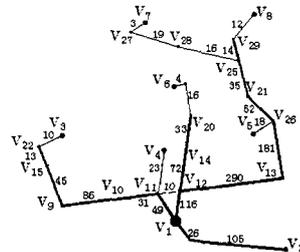


图 4 改进最小生成树算法的规划结果 (2008 年石鼓站)

Fig.4 Planning result of the improved Minimum-Cost Spanning Tree algorithm (Shigu substation of 2008)

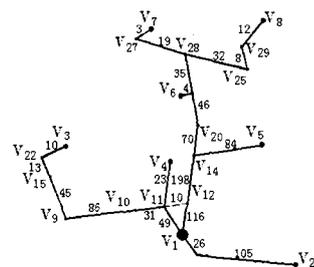


图 5 文献[2]算法规划结果 (2008 年石鼓站)  
Fig.5 The planning result of document [2] (Shigu substation of 2008)

由图 4 可以计算出正常运行方式下网络的总费用(包括建设总费用和单位时间内的网络运行总费用)  $W_{\Sigma 1}=1\ 269$  万元。

图 5 给出了依照文献[2]算法得到的规划结果。计算出正常运行方式下网络的总费用  $W_{\Sigma 2}=1\ 038$  万元。

从以上两种最小生成树算法得到的最终计算结果,可以看出  $W_{\Sigma 2} < W_{\Sigma 1}$ , 也就是说如果只考虑权值和最小,文献[2]得到的规划结果要优于本文的改进最小生成树算法规划结果。但是,文献[2]无法根据供电部门的要求限定主干线路走廊走向,得到的结果只是理论上最优,同实际规划要求还有较大差距。相对来说,图 4 所示的规划结果参考了规划部门对于限定主干线路走廊走向的要求,比较客观地反映了配电网规划的实际操作过程。

### 3 结论

城市配电网是电力系统的重要组成部分,是电力系统的主要负荷中心,同时又是城市现代化建设的一项重要基础设施。城网规划既是电力系统规划的重要组成部分,也是城市规划的重要组成部分。本文提出了一种限定主干网架线路走向的基于改进最小生成树算法的配电网架优化规划方法。经过配电网网架优化规划实例的验证,表明这种方法减小了最小生成树算法的搜索范围,考虑了电力部门对主干网架走向的限定条件,网架优化规划的结果更符合实际。

### 参考文献

- [1] 张李盈,范明天.配电网综合模型和算法的研究[J].中国电机工程学报,2004,24(6): 59-64.  
ZHANG Li-ying, FAN Ming-tian. A New Model and Methodology for Distribution Network Integration Planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2004,24(6): 59-64.
- [2] 刘健,杨文宇,余健明,等.一种基于改进最小生成树算法的配电网架优化规划[J].中国电机工程学报,2004,24(10): 103-108.  
LIU Jian, YANG Wen-yu, YU Jian-ming, et al. An Improved Minimum-cost Spanning Tree Based Optimal Planning of Distribution Networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(10): 103-108.
- [3] 刘健,杨文宇.基于最小生成树算法的配电网架扩展规划[J].电力系统自动化,2005,29(4): 34-39.  
LIU Jian, YANG Wen-yu. Distribution Networks Expansion Planning Based on Improved Minimum-cost Spanning Tree[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 34-39.
- [4] 王成山,王赛一.基于空间 GIS 和 Tabu 搜索技术的城市中压配电网规划[J].电网技术,28(14): 68-73.  
WANG Cheng-shan, WANG Sai-yi. Urban Medium-voltage Distribution Network Planning Based on Spatial GIS and Tabu Search[J]. Power System Technology, 28(14): 68-73.
- [5] 陈根军,李继洗,王磊,等.基于 Tabu 搜索的配电网规划[J].电力系统自动化,2001,25(7): 40-44.  
CHEN Gen-ju, Li K K, WANG Lei, et al. Distribution System Planning by Tabu Search Approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(7): 40-44.
- [6] 兰家隆,刘军.应用图论及算法[M].电子科技大学出版社,1995.
- [7] 王春生,赵凯,彭建春.基于地理信息系统和遗传算法的配电网优化规划[J].电力系统自动化,2000,25(1): 48-51.  
WANG Chun-sheng, ZHAO Kai, PENG Jian-chu. GIS Based Optimal Planning for Distribution System Using GA[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 25(1): 48-51.
- [8] 陈章潮,顾洁,孙纯军.改进的混合模拟退火—遗传算法应用于电网规划[J].电力系统自动化,1999,23(10): 28-31.  
CHEN Zhang-chao, GU Jie, SUN Chun-jun. Application of the Mixed Genetic-simulated Annealing Algorithm in Electric Network Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(10): 28-31.
- [9] 胡斌,顾洁,王衍东.基于蚁群最优的配电网网架规划方法[J].继电器,33(21): 54-57.  
HU Bin, GU Jie, WANG Yan-dong. An Ant Colony Optimization Based Method for Power Distribution Network Planning[J]. Relay, 33(21): 54-57.
- [10] ZHOU Quan, SUN Cai-xin, AN Wen-dou, et al. GIS Based Distribution System Network Frame Optimal Planning[J]. Proceedings of the 2nd ICMEP-ACEID, 2003:423-425.

收稿日期: 2007-01-19;

修回日期: 2007-07-10

作者简介:

陈勇(1975-),男,高级讲师及工程师,硕士研究生,从事电力系统稳定性分析与控制研究以及电网规划工作; E-mail: chen-168@163.com

于家河(1963-),男,讲师,从事电力系统配网自动化研究以及配电网的规划设计等;

谭家茂(1972-),男,工程师,研究方向为继电保护和电能质量分析等。