

# 配电网规划计算机辅助决策系统

张二飞, 冯林桥, 刘金玲, 李涵, 杨艳玲

(湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:** 给出了配电网优化决策的数学模型, 并开发了图形化的配电网规划计算机辅助决策实验系统。配电所的初始位置通过负荷矩法确定后, 采用自动寻优算法确定其最终位置坐标; 采用 prim 算法来优化网架结构; 利用经济电流密度法选择导线截面, 并采用边际电压费用法加以校验。实验系统以 AutoCAD 为图形界面, 结合数据库系统, 实现了数据与图形的联动, 方便数据输入和结果查看。

**关键词:** 配电网; 配电所选址; 网架结构; 导线截面选择; 辅助决策

## Computer aided decision-making system of distribution network planning

ZHANG Er-fei, FENG Lin-qiao, LIU Jin-ling, LI Han, YANG Yan-ling

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** The mathematical models for distribution-network optimization and decision-making are given, and a graphical computer-aided decision-making experimental system of distribution network planning is developed. The initial locations of distribution stations are calculated by load-moment method, then using automatic optimization algorithm, the final locations are located. Network topology is optimized by the prim algorithm. Using economic current density method, the conductor cross-sections are selected, which are checked by marginal voltage cost method. Based on AutoCAD as the graphical interface, the system ties data with graphic, which is convenient for data input and results show.

This project is supported by XJ Foundation of Chinese Electricity Education Foundation(No.[2003]7).

**Key words:** distribution network; location-allocation of distribution station; topological structure; conductor cross-section option; assistant decision

中图分类号: TM715 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)12-0056-04

## 0 引言

配电网设计中需要根据负荷分布来确定配电所的位置, 其确定方法按是否需要预先给定待选所址可分为两类<sup>[1]</sup>。一类是依据规划人员的经验预先给出配电所的可能位置, 进而借助于一些优化算法从待选位置中获得较优的结果; 另一类是通过算法的大范围搜索自动寻优得到。文献[2]提出一种考虑单位负荷距离成本的迭代选址方法, 它从任意给定的坐标出发, 自动计算出最优位置。由于任意给定的坐标导致迭代次数增多, 增加了计算量, 本文利用常用的负荷矩法为算法提供初始计算坐标以减少迭代次数。

配电所的位置确定后, 需要确定网架结构。确

定网架结构的目的其实就是使负荷点从最近的负荷点或配电所得到供电。例如, 一个配电所供电给两个负荷点, 若并联连接比串联连接的线路长, 则选后者。文献[2]利用启发式搜索算法进行网架结构的确定, 但是在线路比较时, 算法中使用的线路长度是两点之间的直线距离, 这与实际布线情况有很大误差, 本文采用折线代替以使结果更切合实际。

合适的导线型号选择是配电网优化决策的核心问题之一, 文献[3]提供了一种配电网导线截面优化决策的综合算法, 它根据配电网的特点, 基于经济电流密度的概念, 提出了边际电压费用的新概念和一整套优化计算方法。但计算中需要提供大量参数, 使算法的可操作性降低, 针对配电网设计中决策过程的特点, 对其进行简化以利于实际应用。

本文在对上述算法综合运用及改进的基础上, 建立了配电网优化决策的数学模型, 开发实现了图形化的配电网辅助优化决策实验系统。该系统提供

了配电所优化选址、确定网架结构、优选导线截面等功能, 通过优化决策使包括配电网投资费用和运行维修费用在内的配电网总费用最小, 对工程设计具有很重要的实际意义和经济意义。算例表明系统适合实际应用, 能有效地辅助决策配电网的设计。

## 1 系统模型与原理

### 1.1 配电所的优化选址

配电所所址的选择应尽量接近负荷中心, 以降低配电系统的电能损耗、电压损耗和有色金属消耗量。配电所的地址优化目标是总的供电成本最小, 决策变量为配电所的坐标。在拥有  $m$  个配电所,  $n$  个负荷点的配电网中, 供电成本为:

$$\min C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n c_{ij} \quad (1)$$

式中:  $c_{ij}$  为从配电所  $i$  到负荷点  $j$  的供电成本。

这里假设供电成本与负荷大小、输电距离成线性关系, 且单个负荷只有一个配电所供电, 第  $i$  个配电所向  $l_i$  个负荷点供电 ( $\sum_{i=1}^m l_i = n$ ), 则有:

$$c_{ij} = \alpha_j \omega_j d_{ij} \quad (2)$$

式中:  $\alpha_j$  为单位负荷距离的成本;  $\omega_j$  为负荷点  $j$  的功率;  $d_{ij}$  为配电所  $i$  到负荷点  $j$  的直线距离。

式 (2) 代入式 (1) 中得到:

$$C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^{l_i} \alpha_j \omega_j d_{ij} \quad (3)$$

使式 (3) 分别对配电所的  $x$ 、 $y$  偏微分为零得:

$$\frac{\partial C}{\partial x_i} = \sum_{j=1}^{l_i} \alpha_j \omega_j (x_i - x_j) / d_{ij} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial C}{\partial y_i} = \sum_{j=1}^{l_i} \alpha_j \omega_j (y_i - y_j) / d_{ij} = 0 \quad (5)$$

由式 (4) 和式 (5) 可得出配电所  $i$  的新坐标为:

$$x_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{l_i} \alpha_j \omega_j x_j / d_{ij}}{\sum_{j=1}^{l_i} \alpha_j \omega_j / d_{ij}} \quad (6)$$

$$y_i^* = \frac{\sum_{j=1}^{l_i} \alpha_j \omega_j y_j / d_{ij}}{\sum_{j=1}^{l_i} \alpha_j \omega_j / d_{ij}} \quad (7)$$

式 (6) 和式 (7) 即为配电所位置坐标的迭代方程。其初始位置由负荷矩法提供:

$$(x_{i0}, y_{i0}) = \left( \frac{\sum_{j=1}^{l_i} P_j x_j}{\sum_{j=1}^{l_i} P_j}, \frac{\sum_{j=1}^{l_i} P_j y_j}{\sum_{j=1}^{l_i} P_j} \right) \quad (8)$$

迭代过程中给出一个精度值, 使新迭代出的位置与前一次计算的位置之差小于精度值, 以判断迭代是否结束。

### 1.2 网架结构的确定

为减少线路敷设, 负荷应从最近的配电所或负荷点引线。可利用最小生成树算法中的 prim 算法来优化网架结构<sup>[4]</sup>。

考虑到实际布线中线路都是沿着道路敷设, 在进行网架结构优化时两点之间的路径长度采用折线长度表示, 即式 (9):

$$L_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (9)$$

式中:  $i$ 、 $j$  为任意点的编号。

算法的具体实现过程为: 先将各负荷点按照到配电所的路径长度从小到大排列, 第一个负荷点应直接由配电所供电, 第二个负荷点则先计算与第一个负荷点的路径长度后, 将其与到配电所的距离比较, 选最小的点连接; 第三个负荷点则在配电所和前两个负荷点中选择路径长度最小的点连接, 同理, 此后的负荷点选择距离自己路径长度最小的点连接, 直到最后一个负荷点。如此便可以确定一个合理的网架结构。

### 1.3 优化导线截面选择

配电网的年计算费用包括年电能损耗费用、年投资费用和折旧费用, 目标函数应为年计算费用最小, 即:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N C_i(S_i) + \sum_{i=1}^N D_i(S_i) \quad (10)$$

式中,  $N$  为导线数;  $S_i$  为第  $i$  条导线的截面积;  $C_i$  为第  $i$  条导线的年投资费用和折旧费用;  $D_i$  为第  $i$  条导线的年电能损耗费用。

年投资费用和折旧费用为:

$$C_i(S_i) = (\alpha + \gamma)(bS_i + c)L_i \quad (11)$$

式中,  $\alpha$  为线路投资回收率;  $\gamma$  为线路折旧维修率;  $L_i$  为导线  $i$  的长度;  $b$  和  $c$  分别为与线路截面无关部分和有关部分的单位造价。

假设各负荷点的功率因数和最大负荷损耗小时数  $\tau$  近似相等<sup>[5]</sup>, 年电能损耗为:

$$D_i(S_i) = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_N^2} \cdot \rho_i \tau \beta L_i \quad (12)$$

式中:  $P_i$ ,  $Q_i$ ,  $U_N$  分别为导线  $i$  的有功功率、无功功率和额定电压;  $\beta$  为可变电价;  $\rho_i$  为导线  $i$  的电阻率, 注意  $\rho_i$  与  $S_i$  是一一对应的关系。

约束条件为每条支路(首端至末端)的电压损耗不超出允许范围。辐射网中的电压损耗为:

$$\Delta U(k) = \sum_{i \in M(k)} \left( \frac{P_i \rho_i + Q_i x_i}{U_N} \cdot L_i \right) \quad (13)$$

式中:  $M(k)$  为第  $k$  条支路的导线集合;  $x_i$  为电抗率。

具体的算法是: 先利用经济电流密度法求出导线截面的初始解, 选出电压损耗最大的支路作为主要支路, 当主要支路的电压损耗不能满足电压约束时, 则计算出主要支路中各段导线的边际电压费用<sup>[3]</sup>, 利用动态规划法<sup>[6]</sup>选出其中的部分导线段来使边际电压费用之和最小, 而电压损耗又满足电压约束。修正导线截面后再选出电压损耗最大的支路做判断, 直到电压损耗满足电压约束则结束计算。

选出主要支路中的部分导线段来修正导线截面, 其实质就是一个 0/1 背包问题, 运用动态规划法可以使截面修正最优。

上述算法将计算出理论优化导线截面, 根据配电网技术导则, 同一个电压级别截面种类不宜超过三种, 在实际应用中应予以校正。

## 2 系统结构和功能

### 2.1 系统结构

该实验系统采用 VB 结合数据库编制, 图形界面采用 AutoCAD 实现。系统的结构图如图 1 所示。

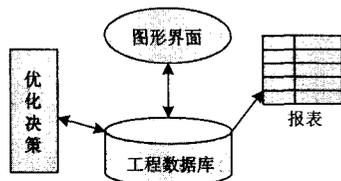


图 1 实验系统结构图

Fig.1 Diagram of experimental system

通过对 AutoCAD 的二次开发<sup>[7]</sup>, 用户从图形界面输入负荷数据和计算用参数, 这些数据直接存入工程数据库供显示或计算时调用; 系统通过 SQL 语言从数据库中精确查询数据供优化决策模块调用, 计算后的结果亦存入工程数据库供报表显示。

将 AutoCAD 的图形句柄一同存入数据库, 可以实现图形与数据的联动。工程数据库中包括导线

参数库供选择。优化决策模块包括配电所的优化选址、网架结构的优化和最优导线截面选择。

### 2.2 系统提供的功能

用户通过添加障碍物绘制出大致的地理图, 再在图中添加负荷并填写负荷参数, 添加配电所并确定其为哪些负荷供电。

数据输入完成以后, 通过点击菜单完成以下功能:

(1) 计算配电所位置并在图中自动绘制连接线。通过一系列计算得出各个配电所位置后, 在图中加入配电所, 并按照优化的网架结构在图中自动绘制出连接线。

(2) 导线型号选择、确定配电所的容量。计算并优化各段导线截面, 并选出合适的标准型号, 之后通过报表显示。

(3) 统计配电所参数和导线型号。从工程数据库中统计配电所的容量、电压等信息通过报表显示; 统计所需导线型号、长度等数据通过报表显示。

## 3 应用实例

已采用该实验系统对某配电网进行辅助决策计算。设计人员可根据计算结果做出正确决策。

该配电网包括 12 个负荷点 (LD1-LD12)、2 个低压配电所 (LTS1、LTS2) 和 1 个高压配电所 (HTS1), 其中 LTS1 为负荷点 LD1-LD5 供电, LTS2 为负荷点 LD6-LD10 供电, HTS1 为负荷点 LD11、LD12 和低压配电所 LTS1、LTS2 供电。

### 3.1 选址结果及分析

通过添加负荷和配电所, 将参数输入系统, 自动选择变配电所位置后得到配电网的网架结构和配电所的位置, 并绘制于图中。如图 2 所示, 虚线为低压配电线路, 加粗实线为高压配电线路。LTS2

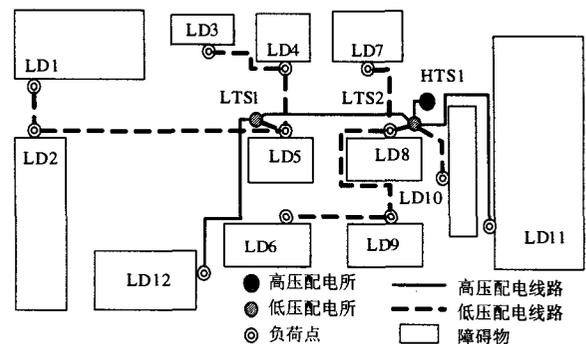


图 2 配电所的位置与配电网的网架结构

Fig.2 Locations of distribution stations and network topology of distribution network

和 HTS1 的计算位置与 LD8 很接近, 故将它们的图形位置稍加移动以便能从图中清楚分辨。

表 1 给出了采用负荷矩法、文献[2]中的直接迭代法以及本文的方法算出的选址结果。从表中可以看出, 经过迭代确定的配电所位置使供电成本显著降低; 表中  $N$  表示迭代次数, 通过对比可知初始位置的给定对迭代次数有影响, 所以由负荷矩法给出初始位置可以明显限制迭代次数。

表 1 三种方法的选址结果

Tab.1 Location-allocation results by three kinds of methods

|      | 负荷矩法       |     | 直接迭代        |     | 本文的方法       |     |
|------|------------|-----|-------------|-----|-------------|-----|
|      | 坐标         | $N$ | 坐标          | $N$ | 坐标          | $N$ |
| LTS1 | (942,1152) | 0   | (1239,1127) | 22  | (1239,1127) | 15  |
| LTS2 | (1811,977) | 0   | (1898,1120) | 18  | (1898,1120) | 10  |
| HTS1 | (1761,782) | 0   | (1896,1113) | 29  | (1896,1113) | 23  |
| 供电成本 | 82.9 万元    |     | 75.5 万元     |     | 75.4 万元     |     |

### 3.2 导线选择结果及分析

优化选择导线时, 输入参数如下:  $\Delta U\% = 3$ ,  $\tau = 4000 \text{ h}$ ,  $\beta = 0.05 \text{ 元}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,  $b = 250 \text{ 元}/(\text{km} \cdot \text{mm}^2)$ ,  $\alpha = 0.12$ ,  $\gamma = 0.035$ 。表 2 给出了经济电流密度法选择的导线截面和采用边际电压费用法校验后的导线截面, 优化过程中对部分导线截面作出调整, 满足了电压损耗约束, 并且使年计算费用明显降低。

表 2 优化选择导线截面的结果

Tab.2 The results of optimal conductor cross-section

| 节点 1      | 节点 2 | 经济电流密度法算            |                   | 优化结果         |  |
|-----------|------|---------------------|-------------------|--------------|--|
|           |      | 出的截面/ $\text{mm}^2$ | 截面/ $\text{mm}^2$ | $\Delta U\%$ |  |
| LTS1      | LD5  | 70                  | 95                | 0.15         |  |
| LD5       | LD4  | 16                  | 16                | 0.67         |  |
| LD4       | LD3  | 10                  | 10                | 0.36         |  |
| LD5       | LD2  | 16                  | 25                | 2.12         |  |
| LD2       | LD1  | 10                  | 16                | 0.21         |  |
| LTS2      | LD8  | 120                 | 120               | 0.002        |  |
| LD8       | LD7  | 35                  | 35                | 0.65         |  |
| LD8       | LD9  | 35                  | 35                | 1.62         |  |
| LD8       | LD10 | 10                  | 25                | 2.53         |  |
| LD9       | LD6  | 16                  | 16                | 1.01         |  |
| HTS1      | LTS2 | 95                  | 95                | 0.003        |  |
| LTS2      | LTS1 | 35                  | 35                | 0.41         |  |
| LTS2      | LD11 | 25                  | 25                | 1.11         |  |
| LTS1      | LD12 | 16                  | 16                | 0.49         |  |
| 年计算费用(万元) |      | 8123.1              | 7541.2            |              |  |

## 4 结论

文章以供电成本最小为优化目标建立了配电所选址的数学模型; 以年计算费用最小为目标对导

线截面优化选择的模型做出简化; 在网架结构确定中, 对搜索算法采用了用折线代替直线的方法, 使原始条件更符合工程实际。基于这些模型和算法, 采用图形化方法实现了配电网设计中的配电所优化选址定容, 网架结构的确定, 导线截面优化选择等功能, 为设计人员的决策过程提供有力的支持。

该系统作为一个决策系统, 是图形化配电网智能 CAD 系统的基础部分。配电网设计中项目繁多, 这里只涉及到部分内容, 进一步的研究是与网络分析和设备选型等设计内容相衔接。

### 参考文献

- [1] 王成山, 魏海洋, 肖峻, 等. 变电站选址定容两阶段优化规划方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 62-66. WANG Cheng-shan, WEI Hai-yang, XIAO Jun, et al. Two-phase Optimization Planning Approach to Substation Locating and Sizing[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 62-66.
- [2] 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.
- [3] 宁宏全, 王晓辉, 赵骅, 等. 配电网导线截面优化决策的综合算法[J]. 电力系统及其自动化学报, 1997, 9(2): 35-41. NING Hong-quan, WANG Xiao-hui, ZHAO Hua, et al. Integrated Algorithm of Optimal Decision-making on Conductor Cross Sections of Electricity Distribution Network[J]. Proceedings of the EPSA, 1997, 9(2): 35-41.
- [4] 杨文字, 刘健, 等. 基于改进 prim 算法的配电网优化规划方法[J]. 电工技术学报, 2005, 20(3): 75-79. YANG Wen-yu, LIU Jian, et al. Distribution Network Optimal Planning Based on an Improved Prim Algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(3): 75-79.
- [5] 李靖霞, 鞠平. 配电网优化规划的基因算法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(20): 12-14. LI Jing-xia, JU Ping. Genetic Algorithms in Distribution Network Planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(20): 12-14.
- [6] 《运筹学》教材编写组. 运筹学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.191-245.
- [7] Kober F, Manzoni A, Lemos F A B. An Objected-oriented Approach to Development and Intergration of Graphical User Interface and Power System Framework[A]. In: IEEE Bologna PowerTech Conference[C]. Bologna(Italy): 2003.

收稿日期: 2007-10-29; 修回日期: 2008-01-23

作者简介:

张二飞(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统仿真和电力系统 CAD 技术; E-mail:erfei225@163.com

冯林桥(1946-), 男, 教授, 研究方向为电力系统运行分析、电力 CAD 及其应用软件的研究开发;

杨艳玲(1973-), 女, 讲师, 研究方向为电力系统及其自动化。