

计及联络线方式的配电网规划方法

常松 许跃进

(中国农业大学 信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要 在建立配电网规划主模型的基础上,通过求取可行联络线集合建立配电网规划的联络线模型。结合图论中的邻接矩阵,提出路径矩阵和路径子矩阵的概念及形成方法,进而提出求取可行联络线集合的算法。实例证明,所提供的方法可有效提高配电网可靠性。

关键词 配电网规划; 联络线; 路径矩阵; 可行联络线集合

中图分类号 TM 715

文章编号 1007-4333(2005)05-0081-04

文献标识码 A

Distribution network planning incorporating tie-line

Chang Song, Xu Yuejin

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

Abstract A tie-line model was developed by working out feasible tie-line set based on developing main model of distribution network planning. A feasible tie-line set were developed on the base of adjacent matrix, path matrix and path sub-matrix. Example proved that the method was feasible and effective to improve the reliability of distribution network.

Key words distribution network plan; tie-line; path matrix; feasible tie-line set

配电网规划问题是一个十分复杂的多阶段、多目标的非线性混合整数规划问题。随着电力市场的不断发展,电力系统供电可靠性与供用电双方的经济利益关系更加紧密,如何提高网架结构的可靠性已经成为配电网规划的重中之重^[1]。关于可靠性问题的处理,一般是把可靠性分析用于事后校验,常用的有 $N-1$ 校验, $N-2$ 甚至 $N-K$ 校验^[2],也有将可靠性和经济性整体考虑的^[3-4],但采用联络线方式计及可靠性的配电网规划方法尚未见报道。本文中提出一种基于联络线方式考虑可靠性问题的配电网规划方法,该方法体现了“闭环设计,开环运行”的规划思想,可增强网架的健壮性和合理性,显著提高电网性能。

1 配电网规划主网架模型

根据配电网正常运行时主网架开环工作而联络线备用的实际情况,本文中配电网规划模型以年费用最小为目标函数,先整体考虑变压器费用和线路

费用,求取辐射型的主网架最优方案,再在此基础上确定联络线方案。

主网架的变压器费用和线路费用各分为投资费用及运行费用,而联络线费用仅考虑投资费用,这是因为故障或者检修的时间一般不会太长,与全年正常运行时间相比可以忽略不计。

采用文献[5]中配电网费用模型作为主网架费用模型,即

$$\min G = C_{ot} + C_{nt} + C_{ol} + C_{nl} = \sum_{i \in J_{ot}} C_{ti}(S_i) + \sum_{j \in J_{nt}} C_{tj}(x_j, S_j) + \sum_{m \in J_{ol}} C_{lm}(P_m) + \sum_{n \in J_{nl}} C_{ln}(y_n, P_n)$$

式中: G 为主网架年总费用; C_{ot} 和 C_{nt} 分别为原有变压器和待建变压器费用; C_{ol} 和 C_{nl} 分别为原有线路和待建线路费用; J_{ot} 和 J_{nt} 分别为原有变压器和待建变压器集合; J_{ol} 和 J_{nl} 分别为原有线路和待建线路集合; x_j 、 y_n 分别为变压器、待建线路的 0-1 决策变量,0 表示“不投建”,1 表示“投建”; S 和 P 分别

收稿日期: 2005-03-07

作者简介: 常松,硕士研究生;许跃进,教授,通讯作者,主要从事电力系统运行分析及仿真、农村电网规划研究, E-mail: x y j @ cau. edu. cn

为变压器容量和流过线路的有功功率。

约束条件:

1) 节点功率平衡约束 $A_{ij} [P_j - P_j] = D_i$ 。式中: A_{ij} 为节点-支路的关联矩阵; P_j 和 P_j 分别为线路的正向功率和反向功率; D_i 为节点负荷。

2) 设备过载限制约束。变压器容量约束 $P_{t,k} < P_{tm,k}$, 线路容量约束 $|P_k - P_k| < P_{lm,k} y_k$ 。式中: $P_{t,k}$ 为变压器输出功率, 可看作电源容量; $P_{tm,k}$ 和 $P_{lm,k}$ 分别表示变压器和线路最大允许容量; 下标 k 表示第 k 台变压器。

3) 辐射网约束 $y_k = m$ 。式中: m 为负荷节点数。

4) 节点电压约束。根据规程规定^[6], 线路 i 末端电压 U_i 与电源点电压 U_2 之间最大允许电压差应满足

$$\frac{(U_i - U_2)}{U_N} \leq 7\%$$

2 联络线规划问题的数学描述

2.1 名词定义

邻接矩阵^[7]: 表示节点间相邻关系的矩阵。如果点 i 和 j 之间有 1 条边, 邻接矩阵中第 i 行第 j 列的元素是 1, 否则为 0。

当事节点: 必须为其提供备用供电电源的负荷节点。

联络线集合和可行联络线集合: 由于故障或线路检修导致配电网主网络无法沿正常供电路径对某个当事节点继续供电时, 必须增加备用供电路径来维持该当事节点的持续供电。所有可增加支路组成的集合称为该当事节点的联络线集合 $N_{LS,i}$, 去除实际问题中不可行的支路后的联络线集合称为可行联络线集合 $N_{LL,i}$ 。 i 为当事节点编号。

二级节点: 1 条供电路径中与电源节点直接关联的节点。

路径矩阵: 用来存储从电源节点到各个末端负荷点的各条供电路径的矩阵, 记为 Y 。

路径子矩阵: 从路径矩阵中分出的、二级节点相同的路径所在列形成的新矩阵。路径矩阵 Y 可分为 n 个路径子矩阵: Y_1, Y_2, \dots, Y_n ; n 为二级节点数。

以图 1 为例, 其路径矩阵和路径子矩阵为

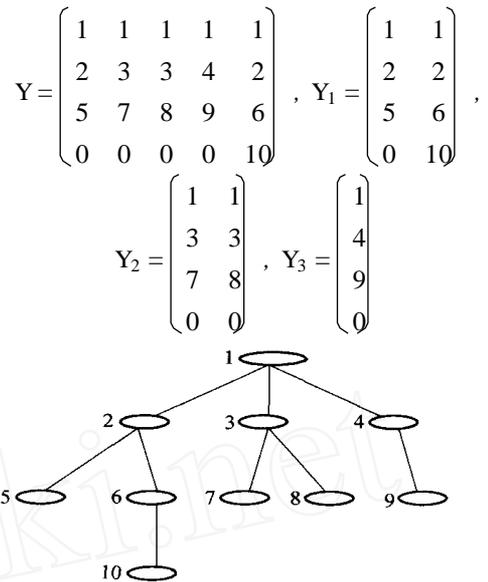


图 1 带有节点标号的 10 节点网络

Fig. 1 Ten-node network with node number

2.2 联络线规划的数学模型

当配电网主网络由于不确定的某条或某几条供电路径故障或检修而无法对某些当事节点继续供电时, 必须从可行联络线集合中选出备用供电路径来维持这些当事节点的持续供电。为保证每个当事节点都能通过增加某条联络线而持续供电, 就要求每个可行联络线集合至少有 1 条联络线被选中。在此基础上, 寻找总投资费用最小的联络线规划方案。

联络线规划的数学描述如下: 设某配电网有 n 个当事节点, 分别对应于 n 个可行联络线集合 $N_{LL,i}, i = 1, 2, \dots, n$ 。令这 n 个集合的并集为 N_{LL} , 则联络线费用模型可表示为

$$\min G_{LL} = \sum_{j \in N_{LL}} z_j C_j$$

约束条件

$$z_j = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n$$

式中: G_{LL} 为联络线总投资费用; C_j 为第 j 条待选联络线投资费用; z_j 为联络线 j 的决策变量, $z_j = 1$ 为选中此线为联络线, $z_j = 0$ 为未选中此线。

3 计算方法

3.1 求解优化模型

对于主网架模型和联络线模型可以采用文献^[8]的遗传模拟退火算法进行求解, 其中变压器容量、变压器 0-1 变量、线路容量、线路 0-1 变量等决策变量可以体现在染色体的编码中, 而节点功率平

衡约束、辐射网约束、设备过载限制约束、节点电压约束则作为适应函数中的惩罚项。解算步骤如下：

- 1) 形成染色体编码及初始方案群；
- 2) 对染色体进行复制、交叉、变异等操作；
- 3) 应用 Metropolis 准则对方案群中各方案进行评价，形成新的解群；
- 4) 判断是否收敛，若收敛转到步骤 6)，否则进行下一步；
- 5) 按一定方式降温后转到步骤 2)；
- 6) 输出最优方案，结束。

3.2 可行联络线集合 N_{LL} 的计算

3.2.1 路径矩阵 Y 和路径子矩阵 Y_i 的计算

本文中提出基于邻接矩阵的逆向搜索法，对于优化计算后的配电网主网架方案，搜索其所有的供电路径，进而形成路径矩阵。步骤如下：

- 1) 初始化路径矩阵 Y ，令 $Y=0$ 。
- 2) 形成主网架的邻接矩阵。
- 3) 搜索只有一个“1”元素的邻接矩阵的行，将满足条件的行的标号记为 i ，对应列的标号记为 j ；按搜索到的先后顺序，将 j 依次存入路径矩阵第 1 行的各个列，其对应的 i 存入第 2 行的各个列。
- 4) 令邻接矩阵中 $x_{ij}=0, x_{ji}=0$ 。
- 5) 对改动过的邻接矩阵按步骤 3) 搜索，将搜索到的每个 i 与邻接矩阵中第 1 行的各个元素 $y_{1,k}$ 比较。若第 k 列元素与 i 相同，则将第 k 列所有元素依次向下移动 1 行，再将对应的 j 赋值给 $y_{1,k}$ ；若不相同，则不变。
- 6) 对邻接矩阵按步骤 4) 置 0。
- 7) 重复步骤 5)、6)，直至邻接矩阵所有元素为 0。

3.2.2 联络线集合 $N_{LS,i}$ 的计算

在主网架网络图中，当事节点及其沿正常潮流方向的所有下游节点组成的节点集合，用 L_1 来标识。将网络拓扑中所有节点看作一个全集，当事节点所在路径的首端节点及其沿正常潮流方向的所有下游节点所组成的节点集合的补集，用 L_2 来标识。

经分析可知，某当事节点的联络线集合 $N_{LS,i}$ 必须满足集合中每条联络线的 2 个端点分别在集合 L_1 和 L_2 中。 L_1 和 L_2 的计算步骤如下：

- 1) 在各个路径子矩阵中搜索该当事节点编号，直至搜到与其完全相同的所有元素为止；
- 2) 在值为此编号的矩阵元素所在列，将该元素及所有行号大于或等于该元素行号的所有元素(0

除外)加入 1 个节点集合，这个集合就是 L_1 ；

3) 这个元素所在路径子矩阵以外的所有路径子矩阵中的元素(0 除外)组成集合 L_2 。

从集合 L_1 和 L_2 里分别取 1 个节点就形成 1 条联络线，取尽所有节点组合就形成不同的联络线，这些联络线组成的集合就是该当事节点的联络线集合 $N_{LS,i}$ 。

3.2.3 可行联络线集合 $N_{LL,i}$ 和 N_{LL} 的计算

从联络线集合 $N_{LS,i}$ 去除实际问题中不可能存在的联络线，就得到了可行联络线集合 $N_{LL,i}$ 。所有当事节点可行联络线的并集构成该配电网的可行联络线集合 N_{LL} 。

图 1 所示节点网络设有 2 个当事节点，即节点 6 和 10。如果选择节点 6 为当事节点，则 $L_1 = \{6, 10\}$ ， $L_2 = \{1, 3, 4, 7, 8, 9\}$ 。图 2 示出当事节点 6 的联络线集合，可行联络线集合为 $N_{LL,6}$ ，同样可以计算出 $N_{LL,10}$ 。它们的并集就是可行联络线集合 N_{LL} 。

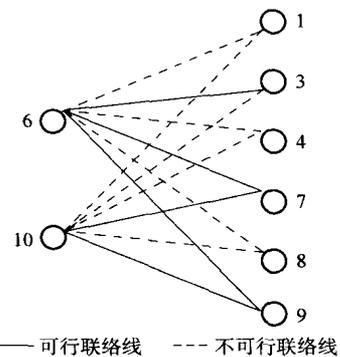


图 2 当事节点 6 对应的联络线图

Fig. 2 Tie-lines of considered node 6

4 算例与结果

以某地区 11 节点 18 条线路的配电网为例，原始数据见表 1 和 2，其中节点 1~10 为负荷节点，11 为变压器节点。线路也可以用其两端节点号表示，如线路 1 表示为 2-11。

表 1 节点功率表

Table 1 Power of load node

节点号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
功率/MW	8	2	4	2	3	4	12	8	4	2

先按照本文的主网架模型规划出主网架结构(图 3)，具体方案见表 3。当事节点的可行联络线集

合从未使用支路中选出。

假设当事节点为节点4和10,按照本文的方法,当事节点4对应的 $N_{LL,1} = \{4-1, 5-10, 5-8, 6-8\}$,当事节点10对应的 $N_{LL,2} = \{5-8, 6-8, 3-10, 5-10\}$ 。根据本文中提出的联络线模型,求得联络线为线路7。

表2 线路信息表

Table 2 Details of line

线路 标号	起点	终点	长度/ km	线路 标号	起点	终点	长度/ km
1	2	11	0.170	10	6	14	0.190
2	11	3	0.239	11	10	3	0.040
3	10	5	0.043	12	9	10	0.040
4	11	10	0.170	13	1	4	0.123
5	3	4	0.043	14	1	2	0.093
6	4	5	0.080	15	5	6	0.097
7	8	5	0.050	16	4	7	0.097
8	8	9	0.038	17	6	8	0.063
9	6	7	0.080	18	11	1	0.244

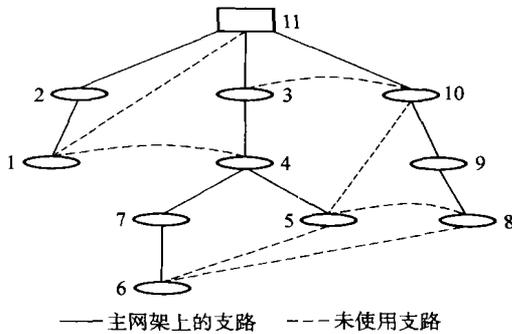


图3 主网架拓扑图

Fig. 3 Main network

表3 优化后主网架结构

Table 3 Results of optimized main network

新建变压器 器编号	新建线路
11	11-2、2-1、11-3、3-4、4-7、7-6、4-5、11-10、10-9、9-8

5 结论

1) 将配电网规划模型分为主网架模型和联络线模型的两阶段规划方法符合配电网的运行实践,即正常时网架开环工作而联络线备用的实际情况,简化了计及供电可靠性的电网规划建模,并将联络线方案的规划与选取纳入数学模型解决方法。

2) 引入图论中的邻接矩阵,以及对路径矩阵、路径子矩阵的定义,实现了可行联络线的确定方法。

3) 与传统方法相比,计及联络线方式的规划方案有利于网络整体性能的提高及网络结构的优化,网架更为合理、可靠,投资费用更低。

参 考 文 献

- [1] Neudorf E G, Logan D M, Porretta B. Cost-benefit analysis of power system reliability: two utility case studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3): 1667~1675
- [2] 程浩忠,高赐威,马则良,等. 多目标电网规划的一般最优化模型[J]. 上海交通大学学报, 2004, 38(8): 1229~1232, 1237
- [3] 张焰. 电网规划中的可靠性成本-效益分析研究[J]. 电力系统及自动化, 1999, 23(15): 32~35
- [4] 贺静,韦钢,张一尘,等. 电网规划方案经济评估方法研究[J]. 华东电力, 2004, 32(7): 21~24
- [5] 王海玲. 农村低压电网规划方法的研究[D]. 北京:中国农业大学, 2001
- [6] 国家电力公司. DL/T499-92. 中华人民共和国电力行业标准[M]. 北京:中国电力出版社, 2000
- [7] 吴文龙. 图论基础及应用[M]. 北京:中国铁道出版社, 1984
- [8] 蔡磊,张焰,程浩忠. 考虑系统暂态稳定性的电网规划方法[J]. 电力系统及其自动化, 2001, 25(6): 45~48