

# 配电网负荷均衡的网络分割算法

林景栋, 曹长修, 张帮礼

(重庆大学自动化学院, 重庆 400044)

**摘要:** 随着配电网规模的不断扩大, 配电网网络重构算法的实时性越来越难以满足工程实用化的要求。而网络重构的结果其实是将一个配电网分割成几部分, 各部分通过常开的联络开关相连。基于此, 提出了配电网负荷均衡的新算法——网络分割算法。该算法将负荷均衡作为一个网络优化问题, 利用配电网的一种新模型——分层拓扑模型, 将全局最优问题转为多阶段分割问题; 同时, 充分利用配电网负荷均衡的特点, 通过寻找源点分支负荷大于负荷平均值的下确界负荷和小于负荷平均值的上确界负荷的方法, 实现了配电网的负荷全局最优均衡。算例的仿真结果说明了该算法的正确、有效和快速。

**关键词:** 负荷均衡; 分层模型; 网络优化; 配电网网络重构; 全局最优

**中图分类号:** TM71      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2003)07-0006-06

## 1 引言

配电网网络重构作为配电自动化中的关键功能, 是提高供电可靠性及运行灵活性的重要保证。任何一个配电网, 理论上均存在一个最优结构, 在这个最优结构下运行, 各源点的协调优于其它方案。配电网网络重构的目的就在于此。配电网网络重构具有极大的经济效益和巨大的市场潜力。

但随着配电网规模的不断扩大, 配电网中源点和 T 接点的不断增多, 配电网网络重构算法的实时性将越来越难以满足工程实用化的要求, 特别是对故障后的恢复供电。目前, 配电网网络重构的算法较多, 这些算法可归为两类: 一类为人工智能算法, 如遗传算法<sup>[1,2]</sup>、模糊遗传算法<sup>[3]</sup>等, 该类算法从理论上可以得到全局最优解, 但其计算时间过长, 在实用化方面面临考验; 另一类为以传统的优化技术为基础的各种优化算法, 如图算法<sup>[4]</sup>、综合潮流模式法<sup>[5]</sup>等, 文献<sup>[6]</sup>介绍了根据负荷分布和线路数量的不同, 将每一馈线分成若干个负荷段, 并假设每段的负荷分布均匀; 采用联络开关的位置作为变量, 假定其变化是连续的, 选用传统的优化方法, 不断改变带联络开关的线路段的位置, 直到目标函数——馈线的有功损耗最小; 该类算法速度快, 方法简单明确, 具有实用化的应用潜力, 但其解易陷于局部最优解<sup>[4]</sup>。同时随着配电网规模的不断扩大、配电网中源点和 T 接点的不断增多, 这些配电网网络重构算法的实时性将越来越难以满足要求。

其实不论哪种网络重构算法, 其结果就是将一个网络分割成几个子网络运行, 各子网络之间通过

常开的联络开关割开。因此配电网的网络重构可以理解为通过分割配电网, 使分割后的各子配电网运行的综合目标最优。本文根据这种理解, 以负荷最优均衡为配电网网络重构的目标, 并将配电网的负荷最优均衡作为一个网络优化问题, 提出了一种新算法——配电网负荷均衡的网络分割算法, 其主要特点为:

- (1) 采用配电网的一种新模型——分层拓扑模型进行描述, 既可表示配电网各顶点的顺序关系, 又可描述各顶点的相隔距离; 既可识别分支与区域, 又能十分方便地计算各顶点负荷。
- (2) 通过组合负荷实现配电网各源点的负荷均衡而非通过组合开关, 即通过寻找源点分支负荷大于负荷平均值的下确界负荷和小于负荷平均值的上确界负荷的方法来实现。
- (3) 对  $N$  源点配电网最多通过  $(N-1)$  次分割, 即可实现配电网的负荷最优均衡, 保证了算法的快速性。

## 2 问题的提出

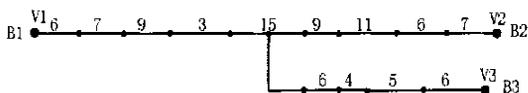
对图 1 所示的两源点配电网, 由 B1、B2 两源点给各负荷供电。要使这两个源点之间的负荷差值最小即源点负荷最优均衡, 只需分割出一个负荷最靠近负荷平均值的源点分支, 即可实现负荷最优均衡。



□表示开关; 数据表示各条弧的负荷; B1、B2 两个是源点

图 1 2 源点的配电网

Fig. 1 Schematic diagram of 2-bus distribution networks



小黑点 - 表示开关;数据表示各条弧的负荷;B1、B2、B3 表示三个源点

图 2 3 源点的配电网

Fig. 2 Schematic diagram of 3-bus distribution networks

对于图 2 所示的 3 源点配电网,其网络拓扑结构可以看成是由三个源点分支和一个区域组成,由于区域只能属于一个源点,那么能否先分割一个源点分支,再分割另一个源点分支,并使分割出的分支就是最后最优结果的组成部分,从而实现负荷最优均衡?同样,对更多源点配电网,其网络拓扑结构中的区域数量随源点数量的增加而逐渐增加,由于区域也只能属于一个源点,那么同样能否通过分割,并使每一次分割出的分支就是最后最优结果的组成部分,从而实现负荷最优均衡?

由于在配电网中经常存在区域和分支,分支必属于某个区域,且分支和区域内的负荷只能有一个源点供电,因此要实现以上的分割思想,就必须寻找一种配电网的拓扑模型,使该模型既可计算负荷,又可识别分支与区域。

### 3 基于分层的配电网分层拓扑模型

**定义 1 耦合点:**(T 接点)在配电网中经常存在三条或三条以上馈线交于一点情况,这一点不是开关,所以该点不装备 FTU,因此这一点的状态既不可测也不可控制。

**定义 2 区域:**与耦合点相联的几条馈线组成的区间称为区域,区域必然只有一条馈线是流入电能,其余为流出电能。即区域只能由一个源点供电。

**定义 3 分支:**即从某一末梢点开始一直到耦合点的几个开关组成一条分支,这条分支上的所有负荷只能由一个源点供电。即在网络重构时应将分支作为一个顶点看待,其负荷为整个分支的负荷。

**定义 4 源点分支:**在配电网的网络重构中经常用到这一概念,即从某一源点开始一直到耦合点的几个开关组成一条分支。

将配电网的馈线当作图中的弧,采用邻接矩阵  $C = (c_{ij})_{N \times N}$  加以描述。根据  $C^k = (c_{ij}^{(k)})_{N \times N}$  的元素  $c_{ij}^{(k)}$  表示顶点  $v_i$  到  $v_j$  长度为  $k$  的通路数目这一特点实现分层模型。

#### 3.1 配电网的分层拓扑模型

分层拓扑模型是求某一点对应的逐层顶点分布模型,该基点可以是源点、末梢点或所需要的某一

顶点。定义分层拓扑辨识矩阵  $A_k = (a_{ij}^{(k)})_{N \times N}$ :

$$a_{ij}^{(k)} = \begin{cases} c_{ij}^{(k)} c_{ij}^{(k)} = 1, & i = j, k = 1, \dots, N - 1 \\ 0 & c_{ij}^{(k)} = 1, i = j, k = 1, \dots, N - 1 \\ 0 & i = j, k = 1, \dots, N - 1 \end{cases} \quad (1)$$

定义基点矩阵  $F_i = (f_{1j})_{1 \times N}$ 。由分层拓扑辨识矩阵可求出基点矩阵对应的分层模型为:

$$\begin{cases} \text{第一层} & y_{i1} = F_i = (f_{i1}, f_{i2}, \dots, f_{iN}) \\ \text{第二层} & y_{i2} = F_i \cdot A = (f_{21}, f_{22}, \dots, f_{2N}) \\ \dots & \\ \text{第 } N \text{ 层} & y_{iN} = F_i \cdot A_{N-1} = (f_{N1}, f_{N2}, \dots, f_{NN}) \end{cases} \quad (2)$$

#### 3.2 配电网区域和分支的辨识

T 接点的度大于 2,因此从邻接矩阵  $C = (c_{ij})_{N \times N}$  可以判断出 T 接点。

$$\deg(C_{ij})_{j=1}^N > 2 \quad \text{则顶点 } v_i \text{ 为 T 接点} \quad (3)$$

定义 T 接点矩阵  $W = (w_i)_{1 \times N}$ ,  $v_i$  为 T 接点,则  $w_i = 1$ , 否则  $w_i = 0$ 。

每个分支的辨识是从末梢点开始,选定一个末梢点,以末梢点为基点,求其分层拓扑模型。分支中各层的顶点应该只有一个,当某一层中的顶点多于一个,则该层已不属于该分支。而该层有两个顶点,则前一层必定为 T 接点,因此通过判断哪一层最先出现 T 接点,则可知该分支到那里为止。但辨识出一个小分支之后,包含该小分支的大分支,其在辨识过程中,会出现同一层中有两个顶点,其中一个为该大分支的顶点,而另一个却为所包含的小分支的顶点,因而需要将这一个顶点去掉,可以通过该顶点的分支状态来判断。不妨设某一分支属于 T 接点  $v_j$ , 则定义分支矩阵  $B_j = (b_i)_{1 \times N}$ , 当  $v_i$  属于该分支时,  $b_i = 1$ , 否则  $b_i = 0$ 。

#### 3.3 配电网源点负荷的计算式

定义负荷矩阵  $L = (l_{ij})_{N \times N}$ ,  $l_{ij}$  ( $i = j$ ) 是弧  $c_{ij}$  对应的负荷,为已知条件;  $l_{ii}$  为顶点的负荷,除末梢点的负荷已知为零外,需计算其余顶点的负荷。

定义顶点状态矩阵为  $T = (t_i)_{1 \times N}$ , 顶点  $v_i$  合闸,则  $t_i = 1$ , 否则  $t_i = 0$ 。

由于区域负荷可由下式算出:

$$l_{pi} = \sum_{j=1}^N c_{ij} \cdot l_{ij} \quad (4)$$

分支负荷可由下式算出:

$$l_{Bj} = \sum_{i=2}^{m-1} \sum_{k=1}^N f_{ik} \cdot t_k \left\{ \sum_{n=1}^N f^{(i-1)} \cdot c_{kn} \cdot l_{kn} \right\} \quad (5)$$

其中  $m$  为该分支从末梢点到 T 接点对应的层数。

分支必定与某区域对应,定义区域分支负荷阵

$$L_{BP} = (l_{BP_i})_{1 \times N}; l_{BP_i} = l_{B_i} + l_{P_i}.$$

经过对区域、分支负荷的预处理,可以推导出各源点的负荷计算公式为:

$$L_{f_{ij}} = f_{1j} \cdot t_k \left[ f_{2k} \cdot [c_{jk} \cdot (1 - b_k)(1 - w_j - w_k) \cdot l_{jk} + c_{ik} \cdot w_k \cdot l_{BP_k}] + \sum_{m=2}^{N-1} f_{mk} \cdot t_k \left[ \sum_{i=1}^N f_{(m+1)i} [c_{ki} \cdot (1 - w_k - w_i) \cdot l_{ki} + c_{ki} \cdot w_i \cdot l_{BP_i}] \right] \right] \quad (6)$$

#### 4 负荷均衡作为图分割问题的数学模型

不妨以三源点配电网对应的图分析对象,如图3所示。对于三源点的配电网D(V,E),顶点数为N,不妨设 $v_1, v_2, v_3$ 为三个源点,邻接矩阵为 $C = (c_{ij})_{N \times N}$ ,负荷矩阵 $L = (l_{ij})_{N \times N}$ ,其中 $l_{ij} = l_{ji}$ 。对于该配电网必可找到两个分割点 $G_1, G_2$ ,如图3所示,在这两点处分割,将使配电网负荷最优均衡。因此对该配电网对应的图分割问题可描述为:

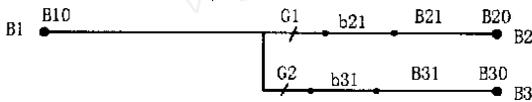


图3 3源点配电网的分割及上、下确界示意图

Fig. 3 Schematic diagram of division of 3-bus distribution networks

在配电网D(V,E)中寻找分割点 $G_1, G_2$ ,将这配电网分割成三部分 $B_1, B_2, B_3$ ,使 $B_1, B_2, B_3$ 的源点负荷 $l_{11}, l_{22}, l_{33}$ 满足以下条件:

$$obj \quad \min[\max(l_{11}, l_{22}, l_{33}) - \min(l_{11}, l_{22}, l_{33})] \quad (7)$$

$$sub \quad \begin{cases} l_{11} + l_{22} + l_{33} = \sum_{i=1}^N l_{ij} & (i < j) \\ i = 1, 2, \dots, N; j = 1, 2, \dots, N \\ l_{ij} = l_{ji} \end{cases} \quad (8)$$

式中 $l_{11} = B_1, l_{22} = B_2, l_{33} = B_3$ 。

式(7)为目标函数,源点的最大负荷与源点的最小负荷之差最小。

式(8)为约束函数,约束条件为:

负荷平衡约束:源点负荷之和等于各弧负荷之和;即确保每一条弧有且只有一个源点对其供电;

容量约束:各顶点及各条弧的负荷不大于其允许的最大负荷;

运行约束:所有弧均可以得到供电且无闭环现象;

拓扑约束:每一个开关和每一条弧的相互联结关系不变。

#### 5 配电网负荷均衡的网络分割算法

对于分割,当所有源点负荷平时,负荷分布最均衡;但由于负荷的分布是由网络的拓扑结构决定的,因此负荷不能任意组合,必须按网络的拓扑结构及负荷的分布进行分割。从2源点配电网的分割算法发现,分割源点负荷时,必须分割与负荷平均值最接近的点,即上确界或下确界的顶点。

定义5 下确界:源点分支负荷中大于负荷平均值的最小值对应的负荷。

定义6 上确界:源点分支负荷中小于负荷平均值的最大值对应的负荷。

##### 5.1 3源点配电网负荷均衡的网络分割算法

本文用 $B_{ji}$ 表示分支的负荷,用 $b_{ji}$ 表示弧的负荷, $j$ 表示第几个源点分支, $i$ 表示第几次计算,如图3所示。为了负荷均衡,负荷区域应归到最小的源点分支负荷中去,这样就可以得到初始状态。而初始状态有以下几种可能:

若在初始状态中,有两个源点分支的负荷小于配电网的负荷平均值,则只需分割这两个源点分支中负荷较大的一个分支,剩下的另两个源点分支,即可按2源点配电网的分割算法进行分割,则此时3源点的配电网即可实现负荷分配最优。

若在初始状态中,假设两个源点分支 $B_2, B_3$ 的负荷均大于配电网的平均负荷值,则必然可以找到它们大于平均负荷值的下确界 $B_{20}, B_{30}$ 和上确界 $B_{21}, B_{31}$ 。

即 
$$\begin{cases} B_{20} = b_{21} + B_{21} > B_p \\ B_{30} = b_{31} + B_{31} > B_p \end{cases} \quad \text{且} \quad \begin{cases} B_{21} < B_p \\ B_{31} < B_p \end{cases}, \text{其余负荷为 } B_{10}.$$
 此时上确界又有以下几种情况:

1) 如果上确界 $B_{21}, B_{31}$ 都小于 $B_{10}$ ,此时任何一个源点的负荷组合到 $B_{10}$ 的那个源点,都会使得源点的最大值更大、最小值更小,从而使配电网的负荷均衡度变差。因此此时 $B_{20}, B_{30}$ 两个源点分支均不应分割负荷到 $B_{10}$ 源点,即此时直接分割 $B_{20}, B_{30}$ ,配电网负荷已达最优均衡。

2) 如果上确界 $B_{21}, B_{31}$ 中只有一个大于 $B_{10}$ ,不妨设 $B_{21} > B_{10}$ 。第一步只有将弧 $b_{21}$ 组合到 $B_{10}$ 即 $B_{11} = B_{10} + b_{21}$ 。若 $B_{11} > B_{30}$ 则分割 $B_{21}$ 分支,剩下的 $B_{11}, B_{30}$ 两个源点分支,即可按2源点的配电网分

割算法进行分割,若  $B_{11} < B_{30}$  则分割  $B_{30}$  分支,剩下的  $B_{10}$ 、 $B_{20}$  两个源点分支,即可按 2 源点的配电网分割算法进行分割,则此时 3 源点配电网达到负荷最优均衡。

3) 若  $B_{21}$ 、 $B_{31}$  满足  $\begin{cases} B_{21} > B_{10} \\ B_{31} > B_{10} \end{cases}$ , 则  $b_{21}$ 、 $b_{31}$  都可能

组合到  $B_{10}$ ,但究竟是选  $b_{21}$  还是选  $b_{31}$  组合到  $B_{10}$ ,才会确保配电网负荷的最优分配呢?即先分割出哪个源点的上确界或下确界。此种状态下有以下命题:

命题一:若  $B_{10}$ 、 $B_{20}$ 、 $B_{30}$  满足  $\begin{cases} B_{20} > B_{30} \\ B_{21} > B_{31} > B_{10} \end{cases}$  且  $b_{21} > b_{31}$ , 则实现负荷最优均衡的第一步是将  $b_{21}$  组合到  $B_{10}$  中,即  $B_{11} = B_{10} + b_{21}$ 。

命题二:

(1) 若  $B_{10}$ 、 $B_{20}$ 、 $B_{30}$  满足  $\begin{cases} B_{20} > B_{30} \\ B_{31} > B_{21} > B_{10} \end{cases}$  且  $(B_{20} - B_{30}) > (B_{31} - B_{21})$ , 则实现负荷最优均衡的第一步是将  $b_{21}$  组合到  $B_{10}$  中,即  $B_{11} = B_{10} + b_{21}$ 。

(2) 若  $B_{10}$ 、 $B_{20}$ 、 $B_{30}$  满足  $\begin{cases} B_{20} > B_{30} \\ B_{31} > B_{21} > B_{10} \end{cases}$  且  $(B_{20} - B_{30}) < (B_{31} - B_{21})$ , 则实现负荷最优均衡的第一步是将  $b_{31}$  组合到  $B_{10}$  中,即  $B_{11} = B_{10} + b_{31}$ 。

从以上负荷组合的命题可以得出最后的最优结果与  $B_{20}$ 、 $B_{30}$  及  $B_{21}$ 、 $B_{31}$  有关。从分割思想可以得出这两个命题所对应的分割算法。该分割算法可以描述为以下的分割规则:

分割规则一:两个源点分支的上、下确界之间的差距必有一个较大,不妨设  $b_{21} > b_{31}$ 。若  $B_{21} > B_{31}$ , 则首先分割  $B_{21}$  分支,剩下的两个源点分支按 2 源点配电网的负荷分割算法即可达到最优均衡。

分割规则二:两个源点分支的上、下确界之间的差距必有一个较大,不妨设  $b_{21} > b_{31}$ 。若  $B_{21} > B_{31}$  且  $(B_{20} - B_{30}) > (B_{31} - B_{21})$ , 则首先分割  $B_{21}$  分支,剩下的两个源点分支按 2 源点配电网的负荷分割算法即可达到最优均衡;若  $B_{21} > B_{31}$  且  $(B_{20} - B_{30}) < (B_{31} - B_{21})$ , 则首先分割  $B_{20}$  分支,剩下的两个源点分支按 2 源点配电网的负荷分割算法即可达到最优均衡。

证明:两个源点分支的上、下确界分别为  $B_{20}$ 、 $B_{30}$  及  $B_{21}$ 、 $B_{31}$ ; 上、下确界之间的差距为  $b_{21}$ 、 $b_{31}$ ; 设  $b_{21} > b_{31}$ 。

若  $B_{21} > B_{31}$ , 则  $B_{20} > B_{30}$ , 按照分割规则一,

此时首先组合弧  $b_{21}$  到  $B_{10}$ , 无论  $B_{11} = B_{10} + b_{21}$  大小如何,  $B_{21}$  都不会再被组合, 因此分割  $B_{21}$  不会影响最后的最优结果。

若  $B_{21} > B_{31}$  且  $(B_{20} - B_{30}) > (B_{31} - B_{21})$ , 按照分割规则二, 此时首先组合弧  $b_{21}$  到  $B_{10}$ , 无论  $B_{11} = B_{10} + b_{21}$  大小如何,  $B_{21}$  都不会再被组合, 因此分割  $B_{21}$  不会影响最后的最优结果。

若  $B_{21} > B_{31}$  且  $(B_{20} - B_{30}) < (B_{31} - B_{21})$ , 按照分割规则二, 此时首先组合弧  $b_{31}$  到  $B_{10}$ , 此时必有  $B_{11} = B_{10} + b_{31} > B_{21}$ 。

假设  $B_{11} < B_{21} < B_{31}$

则  $B_{20} - B_p = (B_p - B_{31}) + (B_p - B_{11}) > (B_p - B_{31}) + (B_p - B_{21})$

而  $B_{11}$  再组合  $b_{21}$  后得到的  $B_{12} = B_{11} + b_{21} < B_{20}$ , 所以  $B_{12}$  无法与  $B_{21}$ 、 $B_{31}$  实现平衡。

所以假设不成立。因此  $B_{20}$  不会再被组合, 因此分割  $B_{21}$  不会影响最后的最优结果。

## 5.2 多源点配电网负荷均衡的网络分割算法

将 3 源点配电网的分割思想推广到多源点配电网, 可以得到多源点配电网的分割算法。由于区域只能属于一个源点, 因此若某一个区域的 2 个源点分支的负荷均小于负荷的平均值, 则可以先分割这两个分支中的一个; 若每一个区域中至少都有一个源点分支的负荷大于负荷平均值, 则此时可以求出大于负荷平均值的源点分支的下确界及小于负荷平均值的上确界, 按以下分割规则进行分割:

分割规则三: 两个上、下确界之间的差距最大的源点分支不妨设为  $B_i$ 、 $B_j$ , 对应的上、下确界之间的差距为  $b_{i1}$ 、 $b_{j1}$ ; 假设  $b_{i1} > b_{j1}$ 。若  $B_{i1} > B_{j1}$ , 则首先分割  $B_{i1}$  分支。

分割规则四: 两个上、下确界之间的差距最大的源点分支不妨设为  $B_i$ 、 $B_j$ , 对应的上、下确界之间的差距为  $b_{i1}$ 、 $b_{j1}$ ; 假设  $b_{i1} > b_{j1}$ 。若  $B_{i1} > B_{j1}$  且  $(B_{i0} - B_{j0}) > (B_{j1} - B_{i1})$ , 则首先分割  $B_{i1}$  分支; 若  $B_{i1} > B_{j1}$  且  $(B_{i0} - B_{j0}) < (B_{j1} - B_{i1})$ , 则首先分割  $B_{j0}$  分支。

## 5.3 多源点配电网负荷均衡的网络分割算法的步骤

首先利用分层拓扑模型求出各个源点分支的负荷, 并计算负荷平均值。若某一个区域的两个源点分支负荷均小于负荷的平均值, 则分割负荷较大的一个源点分支。

剩下的区域中至少都有一个源点分支的负荷大于负荷平均值, 则此时可以求出负荷大于负荷平均值的源点分支下确界及大于负荷平均值的源点分支上确界, 找出这些上、下确界差距最大的两个源点

分支,按照分割规则三、四进行分割。

分割了一个源点分支后,重新计算剩余配电网中各源点分支的负荷,并计算此时配电网的负荷平均值,再按步骤 进行分割。直到配电网已变为三源点配电网为止。

当配电网为 3 源点配电网时,按 3 源点配电网的分割方法进行分割即可。

### 6 多源点配电网负荷均衡的网络分割算法的仿真算例

为了验证本文所提算法的正确性,利用文献[7]的算例进行计算。该算例为西安城东北区 10 kV 配电网,如图 4 所示,图中涉及 4 座变电站,13 条馈线,185 节点,204 条支路,包括 45 个分段开关和 20 个联络开关。

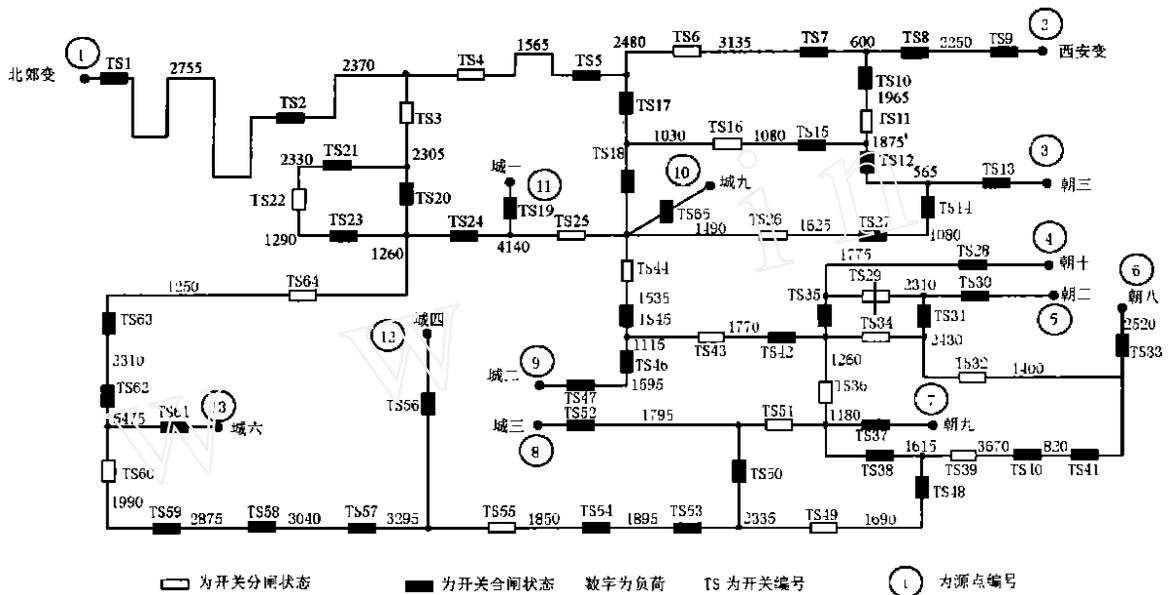


图 4 185 节点配电网示意图

Fig. 4 Simple diagram of 185-bus distribution system

配电网负荷均衡前及均衡后的结果如表 1。

表 1 网络重构前后各源点的负荷分配结果

Tab. 1 The result before and after reconfiguration of the distribution network

源点名称	重构前分闸联络开关	重构前分配负荷	重构后分闸联络开关	重构后分配负荷
北郊变	TS4、TS6、	5125	TS20、TS23、	9760
西安变	TS11、TS16、	7950	TS4、TS6、	7940
朝三	TS3、TS22、	6225	TS11、TS16、	6225
朝十	TS25、TS44、	4805	TS26、TS29、	4805
朝二	TS26、TS29、	4740	TS34、TS43、	4740
朝八	TS34、TS43、	8410	TS32、TS40、	4740
朝九	TS32、TS36、	4485	TS36、TS51、	8155
城三	TS51、TS39、	7875	TS49、TS55、	7875
城二	TS49、TS55、	4245	TS44、TS25、	4245
城九	TS60、TS64	6565	TS63、TS59	6565
城一		11325		7940
城四		11200		9210
城六		9035		9785
重构前各源点间负荷的最大差值				7080
重构后各源点间负荷的最大差值				5540

配电网负荷均衡后的负荷分配结果优于负荷均衡前的负荷分布。分析整个负荷均衡的计算过程,最后的负荷最优均衡结果与配电网的拓扑结构紧密相关,配电网的拓扑约束条件大大减少了负荷的有效组合数量,并加快其最优结果的搜寻。在分割配电网源点的过程中,有时可以分割几个源点所组成的子配电网,再对各个部分进行分割。确保了算法的快速性。

### 7 结论

分层拓扑模型能够有效地将配电网的拓扑结构与配电网的状态电量有机地联成一体,既能明确描述拓扑结构,又能十分方便地计算各点的状态量,为通过组合负荷及通过寻找源点分支负荷大于负荷平均值的下确界负荷和小于负荷平均值的上确界负荷,实现了配电网负荷全局最优均衡的网络分割算法提供了捷径;同时网络分割算法将配电网负荷全

局最优均衡问题分解成多阶段分割决策问题,为配电网网络重构实现最优提供了一条新的途径。算例结果说明本文所提的负荷最优均衡算法是有效的、实用的、正确的、快速的。

#### 参考文献:

- [1] Jung Kyung-Hee, Kim Hoyong, Ko Yunseok. Network reconfiguration algorithm for automated distribution systems based on artificial intelligent approach [J]. IEEE Transaction on PWRD, 1993, 8(4): 1933-1941.
- [2] 刘莉,陈学允. 基于模糊遗传算法的配电网网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(2): 66-69.
- [3] 余贻鑫,段刚. 基于最短路计算方法和遗传算法的配电网网络重构[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 44-49.
- [4] 刘健,程红丽,等. 配电网的模型化方法[J]. 西安交通大学学报, 2000, 34(10): 10-13.

- [5] 雷健生,邓佑满,张伯明. 综合潮流模式及其在配电系统网络重构中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(1): 57-62.
- [6] Aodi K, Ichimori T, Kanezashi M. Normal state optimal load allocation in distribution system [J]. IEEE Transaction on PWRD, 1987, 2(1): 147-153.
- [7] 毕鹏翔,刘健,张文元. 配电网网络重构的改进支路交换法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 98-103.

收稿日期: 2002-11-26

#### 作者简介:

林景栋(1966-),男,副教授,博士,主要研究方向为变电站综合自动化系统和配电自动化系统、人工智能在电力系统中的应用;

曹长修(1937-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为数字信号处理,智能网络及人工智能在电力系统中的应用。

### Graph partitioning method of loads equalization for distribution networks

LIN Jing-dong, CAO Chang-xiu, ZHANG Bang-li  
(ChongQing University, ChongQing 400044, China)

**Abstract:** Along with enlargement of scope of distribution networks and increase of amount of region and complex coupling, algorithms of reconfiguration for distribution networks are becoming difficult to satisfy real-time requirement of engineering applications, especially for restoration for distribution networks. In fact, it is results of reconfiguration for distribution networks to partition distribution networks into some portion. Every portion connects with switches whose position is open. Therefore reconfiguration for distribution networks can be comprehended as partitioning of distribution networks whose object is global optimization. Based on the comprehension, this paper provides a new algorithm—graph partitioning method which make loads equalization as network optimization and is described by hierarchical topology model. It is found that partition of loads is relation of the smallest load of vertex that is bigger than average and the biggest load of vertex that is smaller than average. The graph partitioning method, which optimizes a network by ordering the loads instead of combining the switches, realize a fast algorithm of the loads global optimal equalization for distribution networks by searching of the smallest load of vertex that is bigger than average and the biggest load of vertex that is smaller than average. Results of test show that the method presented is applicable and efficient.

**Key words:** loads equalization; hierarchical model; network optimization; reconfiguration; global optimization

(上接第5页)

收稿日期: 2002-12-11; 修回日期: 2003-03-07  
作者简介:

王承民(1970-),男,目前在上海交通大学从事博士后研究工作,研究方向为电力市场;

侯志俭(1942-),男,博士生导师,教授,研究方向电力市场,静态安全分析及配电网重构。

### The failure analysis and the decision-making model research for power market with demand bids

WANG Cheng-min, HOU Zhi-jian  
(Dept. of E. E., Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** The electricity markets which can't automatically achieve the equilibrium and effectively deploy the resources due to the particularity in power market is a new issue in the power system research, so there must be an operation organ for power market. The operators have to introduce the participators to trade by power market efficiency maximum as the power system security and integrality are ensured. In the paper the power market failure mechanism is analyzed and a new decision-making model is proposed. The model proposed here has been proved on a simple testing system.

**Key words:** power market; market failure; efficiency of the market