

# 最小断点集的简化计算与组数扩充

周文越<sup>1</sup>, 李霞<sup>2</sup>

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041)

**摘要:** 为简化最小断点集的计算, 通过割节点对电网进行分割。在每个子网中, 根据主后备保护配合关系, 形成了保护配合矩阵, 并对矩阵进行化简以降低保护配合矩阵的维数, 通过动态调整保护配合矩阵得到子网的最小断点集。将最小断点集的分布规律引入到计算过程中, 扩充最小断点集的组数。算法在降低计算量的同时可得到多组最小断点集。通过算例验证了所提出方法的简易性和实用性。

**关键词:** 整定计算; 最小断点集; 电网分割; 组数扩充; 保护配合矩阵

中图分类号: TM744 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2018)04-0005-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.04.002

## Simplified Calculation of Minimum Break Point Set and Its Sets Increasing

Zhou Wenyue<sup>1</sup>, Li Xia<sup>2</sup>

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China;

2. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

**Abstract:** In order to simplify the calculation of minimum break point set (MBPS), firstly the power grid is divided. The protective coordination matrix is generated by the relationship of main and backup protection in every sub-network. The matrix is simplified to decrease the dimension. The MBPS of sub-network is obtained by adjusting the protective coordination matrix dynamically. For increasing the sets of MBPS, the MBPS distribution law is introduced. The proposed method can reduce the calculation capacity and get much more sets of MBPS. The simplification and practicality of the proposed method is verified by an example.

**Key words:** setting calculation; minimum break point set; power grid partition; sets increasing; protective coordination matrix

## 0 引言

计算最小断点集(minimum break point set, MBPS)是复杂环网方向保护整定的第一个步骤。近年来,国内外学者在这方面做了大量的研究。文献[1-4]基于图论的相关方法计算 MBPS, 这种方法需要找出网络的有向简单回路, 因此当电网规模较大时计算量将会相当大。文献[5]提出了保护的主后备配合关系, 通过对保护配合依赖度的动态调整计算 MBPS。文献[6]在文献[5]的基础上, 将保护的配合关系用一个 0-1 矩阵表示, 通过对矩阵的行列化简运算计算 MBPS。上述两种方法不用寻找网络的有向简单回路, 计算量较小, 但当网络规模较大时, 矩阵维数过

大, 计算较为繁琐, 并且不能得到多组最小断点集。文献[7]将在计算 MBPS 前, 通过一系列原则对问题进行简化, 降低计算复杂度。文献[8]通过网络简化和有向图化简计算 MBPS, 但需要多次进行网络拓扑分析。

通常情况下, 电网会有多组基数相同的 MBPS, 在进行整定计算时, 整定计算人员需根据电网的实际情况, 选择一组最合适的 MBPS<sup>[9]</sup>。因此, 在计算 MBPS 的过程中, 应尽量得到多组基数相同且最小的 MBPS, 以方便工程选择。在现有的算法中, 通过图论和智能算法可求得的 MBPS 组数较多, 但计算复杂。通过保护配合关系计算 MBPS 的算法较为简单, 但得到的 MBPS 组数较少。于是需在算法简单性和 MBPS 组数之间找到平衡点。首先通过割节点

将电网分割成多个互不关联的连通子网,各个子网内 MBPS 的计算互不影响,再运用保护配合关系,形成各个子网的保护配合矩阵,通过矩阵化简并行计算各个子网的 MBPS,然后根据 MBPS 的分布规律,对子网 MBPS 的组数进行扩充,最后将各个子网的 MBPS 进行组合便可得全网的 MBPS。

### 1 电网分割

通常情况下,电网是由多个互不关联的连通子网组成,子网间不存在回路。因此,各子网计算 MBPS 互不影响。将电网分割后,将降低计算量。

为简化电网分割,首先需要对电网进行简化处理。电网中大量存在两个节点之间连接多条线路的情况,称之为平行线路,将这些平行线路用单回线代替可降低电网分割计算量<sup>[8]</sup>。另外,对于终端线路,无法形成回路,因此将其作为单独的子网处理,在进行电网分割前,首先将其分离。

找到电网的割节点,便可对电网进行分割,采用文献[10]的方法通过广度优先搜索技术寻找割节点。该方法基本思路为:消去与节点相连的支路,然后从余下的节点出发,若搜索到的节点数目与网络节点数不相等,则说明该节点为割节点。

在割节点处断开电网,即可得到多个互不关联的连通子网。

### 2 子网 MBPS 计算

计算出各个子网的 MBPS 是算法的核心部分,这里采用保护配合矩阵来计算子网 MBPS。

#### 2.1 保护配合矩阵

图1为一简单的不可再分割的连通子网。

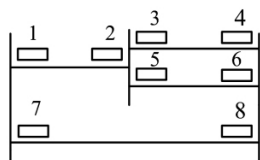


图1 子网

图1所示子网保护间的配合关系可以用一个矩阵表示  $A = (a_{ij})$  称其为保护配合矩阵<sup>[6]</sup>。其中  $A$  为  $n$  阶方阵  $n$  为保护的个数。如果保护  $i$  是保护  $j$  的后备保护则  $a_{ij} = 1$ , 否则为 0。所示网络的保护配合矩阵  $A$  为

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

#### 2.2 保护配合矩阵化简原则

为降低计算的复杂度,在计算 MBPS 之前对保护配合矩阵进行化简。

根据保护之间的配合关系可形成保护配合关系有向图<sup>[8]</sup>,有向图中的顶点代表保护,有向边表示保护间的配合关系,有向边的方向为从后备保护指向主保护。因此计算 MBPS 可转化为找出有向图的最小反馈点集,以断开保护组成的所有有向回路。由此可将有向图的化简原则用于 MBPS 的计算中,为保护配合矩阵化简。若保护  $i$  仅有一个后备保护  $j$ ,即保护配合矩阵中的第  $i$  列只有第  $j$  个元素为 1,其他都为 0,则可将保护  $i$  与保护  $j$  合并。矩阵操作为:将第  $i$  列加到第  $j$  列,然后删除第  $i$  行和第  $i$  列;若保护  $i$  仅有一个主保护  $j$ ,即保护配合矩阵中的第  $i$  行只有第  $j$  个元素为 1,其他都为 0,则可将保护  $j$  与保护  $i$  合并,矩阵操作为:将第  $i$  行加到第  $j$  行,然后删除第  $i$  行和第  $i$  列。

对于平行线路,如图1所示的保护3、4、5、6平行线路保护集,由于相同节点上的两个保护配合关系一样,因此可以合并,将平行线路等效成单回线处理。如图1上的保护3和5、保护4和6。矩阵操作为:分别删除平行线路两个节点上其中一个保护所对应的行和列。对于图1所示网络,可删除其保护配合矩阵的第3行、第3列、第4行、第4列。

#### 2.3 子网 MBPS 计算方法

若某个保护的后备保护越多,则该保护越有可能被选为断点。计算子网 MBPS 的核心思想就是通过判断后备保护的数目选择断点。

定义1:定义保护  $j$  的后备保护数量为保护  $j$  的配合后备依赖度(backup dependency, BD)。

定义2:定义保护  $i$  的主保护数量为保护  $i$  的配合主依赖度(primary dependency, PD)。

在得到保护配合矩阵后,便可按式(2)求出每个保护的 BD 和 PD。

$$BD_j = \sum_{i=1}^N A_{ij} \quad PD_i = \sum_{j=1}^N A_{ij} \quad (2)$$

式中:  $N$  为网络中保护的总数;  $A_{ij}$  为保护配合矩阵第  $i$  行第  $j$  列的元素。

计算子网 MBPS 步骤如下:

步骤 1: 根据子网中保护的主后备关系形成保护配合矩阵  $A$ 。初始化断点数组  $S$ 。

步骤 2: 对保护配合矩阵进行化简。

步骤 3: 计算每个保护的 PD, 若某保护的 PD 为 0 则删除保护配合矩阵中该保护对应的行和列。重复此过程直至矩阵无法进行删减。

步骤 4: 计算每个保护的 BD, 将 BD 最大的保护选为断点, 存入断点数组  $S$ , 并删除该保护对应的行和列。

步骤 5: 重复步骤 3 和步骤 4 直到矩阵中的所有保护都被消去。

步骤 6: 搜索数组  $S$  中的保护, 若有平行线上的保护, 则将与之合并的同节点上的保护存入  $S$  中。

### 3 子网 MBPS 组数的扩充

按照所提出的方法, 可得到子网的一组 MBPS。而下面将阐述在一组 MBPS 的基础上得到多组 MBPS 的方法。

#### 3.1 根据独立支路扩充

电网中存在许多无分支线路, 如图 2 所示, 保护 1 和 2 所在的线路、保护 3 和 4 所在的线路以及保护 5、6、7、8 所在的线路都为无分支线路。若 MBPS 中的一个断点保护所在的有向回路包含无分支线路上的保护, 且该无分支线路包含两个以上的保护, 则可用有向回路中处于该无分支线路上的另一个保护替代原保护作为断点。对于图 2 所示电网, 若求得其一组 MBPS 为 {1, 3, 5}, 而保护 5 和 7 处于一条有向回路, 则将保护 5 用保护 7 替代可得另一组 MBPS {1, 3, 7}。

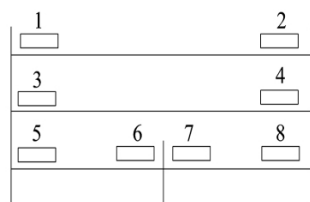


图2 无分支线路

#### 3.2 根据 MBPS 对称分布特性扩充

文献 [11] 证明 MBPS 的分布具有对称特性, 即

对于子网的 MBPS, 其中的每个断点保护所对应的同一条线路上的对端保护所构成的保护集合也是该子网的 MBPS。

如图 3 所示, 保护 1 和 3 构成该子网的一组 MBPS, 这两个保护所对应的同一条线路上的对端保护 2 和 4 同样为该子网的一组 MBPS。

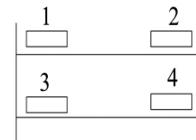


图3 MBPS 的对称特性

根据 MBPS 的对称分布特性, 取原有的 MBPS 中的每个断点保护同线路上的对端保护, 即可得到另一组完全不同的 MBPS。

## 4 全网 MBPS 计算步骤

全网 MBPS 的计算步骤如下:

步骤 1: 简化电网, 找出割节点, 在割节点处将电网分割成若干个子网。

步骤 2: 形成各个子网的保护配合矩阵, 并进行化简, 根据第 2.3 节的方法计算各个子网的 MBPS。

步骤 3: 根据独立支路对各个子网的 MBPS 进行扩充。

步骤 4: 根据 MBPS 对称分布特性对各个子网的 MBPS 进行扩充。

步骤 5: 将各个子网的 MBPS 组合起来便可得到全网的 MBPS。

## 5 算例分析

算例电网如图 4 所示。

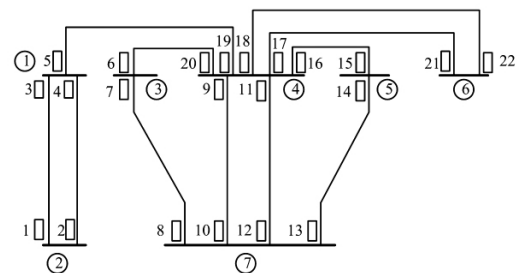


图4 算例电网

采用广度优先搜索技术得到电网的割节点为节点 1 和节点 4, 在割节点处将电网分割成 4 个互不

关联的连通子网,如图5所示。

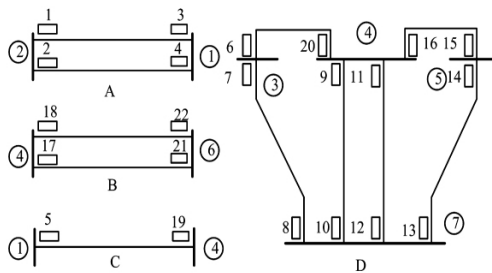


图5 分割后的电网

在这4个连通子网中,子网C为单回线路构成的网络,在未分割前的电网中,子网C为非末端线路,该线路两端保护的主保护处于其他子网中,因此确定了其他子网的整定顺序,就可确定该线路两端保护的整定顺序。故子网C的两个保护不作为断点。

子网A和子网B为平行线路,选择平行线路的一端作为MBPS,其MBPS分别为{1,2}和{18,17}。根据MBPS的对称分布特性进行扩充,最后得到子网A的MBPS为{1,2}和{3,4},子网B的MBPS为{21,22}和{18,17}。

子网D较为复杂,根据所提方法求得其MBPS为{8,10,12,13}。保护8、7、6、20和保护13、14、15、16所在的线路为无分支线路。保护6和8处于一条有向回路中,保护13和15处于另一条有向回路中,因此分别将保护6和13用保护8和15替代得另外3组MBPS: {6,10,12,13}、{8,10,12,15}、{6,10,12,15}。再根据MBPS对称分布特性可得另外4组MBPS: {7,9,11,14}、{20,9,11,14}、{7,9,11,16}、{20,9,11,16}。可以看出,一组MBPS通过所提方法进行扩充,可得8组MBPS。

将各个子网的MBPS组合起来便可得全网的MBPS。通过排列组合,采用所提方法,最终可得32组算例电网的MBPS。经过所提方法对MBPS进行扩充后,可极大地增加MBPS的组数,有利于工程选择。

## 6 结 语

在MBPS的简化计算和MBPS组数的扩充两方面进行了研究。将电网分割成互不关联的连通子网,然后通过保护配合矩阵计算各个子网的MBPS,在求得子网的MBPS后,对其进行扩充,得到子网的多组MBPS,最后将各个子网的MBPS组合起来得全

网MBPS。通过保护配合矩阵的化简,简化了子网MBPS的计算,而MBPS的扩充又增加了MBPS的组数,为实际工程应用提供了更多的选择。

## 参考文献

- [1] Damborg M J, Ramaswami R, Venkata S S, et al. Computer Aided Transmission Protection System Design, Part I: Algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1984, 103(1): 104-114.
- [2] 吕飞鹏, 米麟书, 姜可薰. 环网方向保护配合最小断点集的神经计算方法[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 184-189.
- [3] 刘丹, 吕飞鹏. 基于蚁群算法的环网方向保护配合最小断点集计算[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(21): 27-31.
- [4] Bapeswara Rao V V, Sankara Rao K. Computer Aided Coordination of Directional Relays: Determination of Break Points [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1988, 3(2): 545-548.
- [5] 吕飞鹏. 基于配合关系计算复杂环网保护最优配合顺序的新方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(24): 65-69.
- [6] 吕飞鹏, 陈绩. 基于配合依赖关系图计算环网方向保护最优配合顺序的新方法[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 40-44.
- [7] S. M. Madani, H. Rijanto. Protection Co-ordination: Determination of the Break Point Set [J]. IET Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1998, 145(6): 717-721.
- [8] 刘丹, 吕飞鹏. 基于网络化简和配合关系的最小断点集计算方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(16): 24-27.
- [9] 李运坤, 吕飞鹏, 陈新, 等. 基于节点重要度估计的多组同基最小断点集选取方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 58-60.
- [10] 周文越, 吕飞鹏. 利用2-树计算环网方向保护配合最小断点集[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2012, 39(6): 13-17.
- [11] 晋龙兴, 李银红, 石东源, 等. 计及空间分布特性的最小断点集优化求取方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 60-65.

作者简介:

周文越(1989), 硕士、工程师, 主要从事电力系统继电保护运行、检修、研发相关工作;

李霞(1988), 硕士、工程师, 主要从事电力系统调度控制工作。

(收稿日期: 2018-05-03)