

一种新的基于图论 确定所有最小断点集方法

冯 艳,徐玉琴,沈志强

(华北电力大学 电气工程学院,河北 保定 071003)

摘要:在复杂环网的继电保护整定计算过程中,必须确定方向过流保护和距离保护的整定配合顺序,而整定计算的起点即断点的确定尤为重要。利用图论方法确定了一些旨在降低求取最小断点集问题复杂度的原则,如网络分割、最少断点数的确定、不考虑相邻保护、对称、无平行线网络选择断点等原则,并利用这些原则提出了逐步求取网络所有最小断点集的方法。算例表明该方法降低了计算最小断点集问题的复杂度,且具有一定的有效性和通用性。

关键词:环网;整定配合;断点集;图论

中图分类号: TM 744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)03-0087-04

0 引言

随着电力系统的不断发展,电力网络逐渐形成多环多回路的复杂环形结构,因此在这种现代大规模多环复杂电网中,对方向过电流保护和距离保护(以下简称方向保护)进行的整定配合工作就变得繁重且极为耗时。这其中一项很复杂的工作就是确定一套最少的且合理有效的保护,以断开所有有向回路,作为整定配合的起点。这组保护即称为最小断点集 MBPS(Minimum Break Point Set)。MBPS 的主要特点是:如果 MBPS 里所有保护的整定值已知,则其余保护的整定配合值也可以相继确定;以 MBPS 作为整定配合的起点可以保证在每次迭代中每个保护的整定值只需计算一次。

收稿日期:2004-09-01

国内外学者已在确定最小断点集上做了很多工作^[1~8],但这些方法都存在不足。本文提出了一种新的基于图论理论的确定最小断点集的方法。首先,对电力网络进行拓扑分析,形成系统的简单回路矩阵,然后利用由图论理论而形成的一些行之有效的原则确定断点。此方法原理简单明确,易于编程实现,且大大缩短了计算时间。由于可找出系统所有的最小断点集,因此为充分考虑断点的工程特点和要求确定具有工程意义的最优断点集作好了准备。

1 降低求取 MBPS 问题复杂度的一些原则

通常,对最小断点集的确定就是在环网中寻求一组最少数目的保护,这组保护可以断开系统所有的顺时针方向和逆时针方向的有向回路。基于这一原则,每一个电力网络都可能存在多个最小断点集。

1.1 网络分割

a. 现代大规模电网的回路分布具有总体分散、

局部集中的特点^[9]。从总体看,现代电网通常分布为几个子网,各个子网间由联络线连接,子网间不存在回路相连;从局部看,每个子网中往往存在众多的回路。根据这一特点,可以在确定最小断点集之前首先判明被研究的具体网络是否为可分连通图。将系统划分为一定区域分别求取断点的方法可以大大减少工作量。

b. 在描述下面的分割原则前先解释两个名词。
分割母线(cut-bus):如果移开某一母线,将网络分割成两个或多个子网,则此母线称为分割母线。

区段(block):不含有任何分割母线的网络称为区段。确定一个网络 N 的区段的步骤是先假设母线 C 为 N 的分割母线,此母线的移开令 N 分割成非连通的子网 $s_1, s_2, \dots, s_m$;再将母线 C 添加到每一个子网中,即 $B_i = s_i \cup \{C\}$,从而得到 N 的区段。如果网络有多个分割母线,则对每一个分割母线都重复此过程。

网络 N 的最小断点集是其所有区段最小断点集的总和。图 1 描述了这一原则。图中,母线 C 是分割母线,对网络 N 的 BPS 的确定可以分成两部分,即分别对区段 s_1 和 s_2 求取 BPS 即为 N 的 BPS。

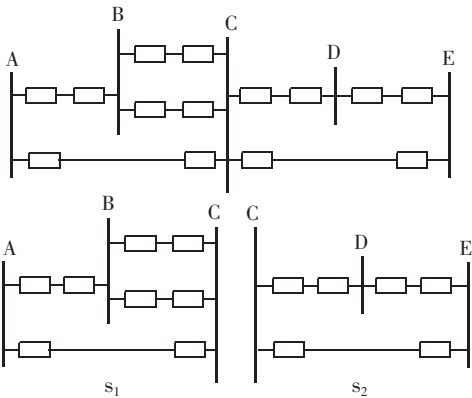


图 1 网络 N 和区段 s_1, s_2
Fig.1 Network N and block s_1, s_2

应用原则 **a, b** 可以将求解一个大型网络的 BPS 这样一个复杂的问题分解成几个小的子问题,从而降低了问题的复杂度,大大减少了计算时间。

1.2 最少断点数的确定

对于不可分连通图,其最少断点数为

$$N_{BP} = N_L + 1$$

式中 N_{BP} 为最少断点数; N_L 为网络连支数。

若切除一条支路或割断某一母线,该网络可分解为两个独立连通图,则全网的最少断点数为

$$N_{BP} = N_L + 2$$

依次类推,若原网络可以分解成 n 个独立连通图,则总的断点数为总连支数 N_L 再加上 n 。

1.3 不考虑相邻保护

如果某一保护为断点(BP),则其相邻的保护(位于此保护所在线路的另一端的保护)在后续的寻求断点的过程中不考虑其作为断点。

1.4 对称原则

令 R_A 和 R_B 为位于一组平行线路两端的保护,则令保护 R_A 作为断点集成员,不考虑 R_B ;或令 R_B 作为断点集成员,不考虑 R_A 。如图 2 所示网络,其断点集中包含保护 $\{r_1, r_3\}$,无 $\{r_2, r_4\}$;或包含 $\{r_2, r_4\}$,无 $\{r_1, r_3\}$ 。

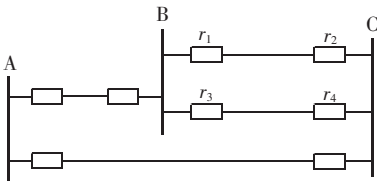


图 2 对称原则图示 1
Fig.2 Illustration 1 of symmetrical lemma

如果存在两条线路与另外一条线路相平行的一组平行线路,则这两条线路同端的两个保护中的任意一个均可与另一条线路同一侧的保护作为最小断点集成员。如图 3 所示,其断点集中可以有 $\{25, 18\}$,也可以有 $\{25, 17\}$,或 $\{11, 3\}$, $\{11, 4\}$ 。

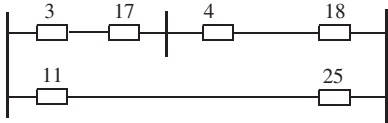


图 3 对称原则图示 2
Fig.3 Illustration 2 of symmetrical lemma

如果存在如图 4 所示的情况,则网络的最小断点集为: $\{2, 4, 6\}$, $\{1, 3, 5\}$, $\{101, 103, 6\}$, $\{102, 104, 5\}$ 。

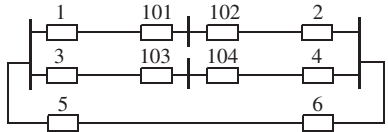


图 4 对称原则图示 3
Fig.4 Illustration 3 of symmetrical lemma

1.5 无平行线网络选择断点原则

如果某一网络没有平行线路,则选具有最多出线数的节点(母线),靠近这个节点的保护就被选为断点。如果此网络有 n 个相同最多出线数的节点,则选择连接此 n 个节点的线路上同一端的保护作为断点,另一端的保护作为另一断点集中的成员。

2 求取最小断点集

以下就是运用上述原则逐步确定出所有最小断点集的工作,下面介绍其具体操作步骤。

a. 首先,确定一个被研究的具体网络是否为可分连通图。如果为可分连通图,则运用上述原则 1.1 将网络分割成几个不可分的子网,然后对每个子网求取断点集;如为不可分连通图,则直接对此网络求取最小断点集。

b. 利用原则 1.2, 确定不可分连通图的最少断点数。然后,对其进行拓扑分析,形成其简单回路矩

阵 L_D 。 L_D 阵可由基本回路的线性组合得到,其具体实现过程见文献[10]。

c. 判断此不可分连通图是否有平行线路, 如果存在则进入步骤 d, 如果不存在则进入步骤 i。

d. 将每一组平行线路同一端的保护作为断点集成员, 从 L_D 阵中删除每一断点对应的列和此列非零的各行, 形成新的 L_D 阵。利用原则 1.4, 另一端的保护作为另一断点集的成员, 在新一轮寻求断点集的过程中重复上述工作。

e. 检查新形成的 L_D 阵是否变为零阵, 如果是, 则断点集寻求完毕, 输出结果; 如果非, 则转入步骤 f。

f. 在新形成的 L_D 阵中利用不考虑相邻保护原则, 除去已求出断点的相邻保护, 计算其他各列非零元素的个数, 即权值。将权值最大和次最大的列所对应的保护存于数组 C 中。如 $C = \{a_1, a_2, \dots, a_m, b_1, b_2, \dots, b_n\}$, 其中 $a_1, a_2, \dots, a_m$ 为权值最大的列对应的保护, $b_1, b_2, \dots, b_n$ 为权值次最大的列对应的保护。

g. 对集合 $a_1, a_2, \dots, a_m$ 和 $b_1, b_2, \dots, b_n$ 分别检查集合中是否有这样一些保护, 即它们所对应的列在 L_D 阵任一行里同时为 1, 同时为 0。如 $b_i, b_j, \dots, b_k$ 为这样的保护, 则令其为一个单元 C_i , 如果 b_i 为断点, 则 C_i 中任一其他元素都可作为断点; 如果 b_i 不是断点, 则此单元中所有其他元素都不是断点。

h. 对数组 C 中的每一个元素或单元如 a_i 所对应的列非零的每一行作如下操作: 寻找此行中是否有数组 C 中其他元素或单元所对应的列在此行非零, 如果有则检查下一行, 如果无则停止搜索, 确定 a_i 为断点。确定 C 中所有的元素和单元后, 将新确定出的每一个断点在 L_D 阵中删除其对应的列和此列非零的各行, 然后转入 e。

i. 利用原则 1.5, 如果此网络只有一个最多出线数的节点, 则从 L_D 阵中删除利用原则 1.5 所求出的每一个断点所对应的列和此列非零的各行, 形成新的 L_D 阵。再从 L_D 阵中选择非零元素最多的列(如第 k 列) 作为断开点, 从 L_D 阵中删除第 k 列和第 k 列非零各行, 形成新 L_D 阵, 并继续寻找非零元素最多的列, 直到 L_D 阵全零。如果此网络有 n 个相同最多出线数的节点 $\{N_1, N_2, \dots, N_n\}$, 假设连接此 n 个节点的线路 $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 都发自节点 N_1 。利用原则 1.5 确定线路 $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 上同一端的保护为断点, 将每一个断点对应的列和此列非零的各行从 L_D 阵中删除后, 对 $\{N_2, \dots, N_n\}$ 中的每一节点, 寻找其所有出线上与 $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 中与此节点相连的线路 c_i 上已确定为断点的保护有相同保护指向的保护, 且在 L_D 阵中对应的列非零元素最多, 则此保护即为断点。同理对线路 $\{c_1, c_2, \dots, c_m\}$ 上另一端的保护进行上述操作以寻求新的一组最小断点集。

3 算例

以图 5 所示网络 N_1 为例, 判断 N_1 为不可分连通

图, 且最少断点数为 4。形成简单回路矩阵 L_D 后, 按以下步骤寻求最小断点集。

a. 图中 A, E 为两条平行线路, 则利用对称原则 1.4, 判断 $\{a, e'\}$ 为一组断点集成员, $\{a', e\}$ 为另一组断点集成员。

b. 对于 $\{a, e'\}$, 在 L_D 中删除此两个断点对应的列和该列非零的各行后, L_D 阵为非零阵。

c. 在新形成的 L_D 阵中寻找非零元素最多和次最多的列, 形成数组 $C = \{f', c, d, g, b'\}$, 其中 f' 权值为 4, 其他各为 3。

d. 检查数组 C 确定 $\{c, d, g\}$ 为一个单元。

e. 对数组 C 的 f' 其对应列非零的各行, 检查是否有这样的行, 即此行中 $\{c, d, g\}$ 单元、 b' 对应的列在此行均为 0。结果没有这样的行, f' 可排除。同理检验 $\{c, d, g\}$ 单元、 b' , 均可以找到这样的行, 可以判定 $\{c, d, g\}$ 单元、 b' 为断点集成员。

f. 将新确定出的断点在 L_D 阵中删除其对应的列和此列非零的行, 得到的 L_D 阵为零阵, 则断点判断完毕。得到的断点集为 $\{a, e', c, b'\}, \{a, e', d, b'\}, \{a, e', g, b'\}$ 。同理可得另外 3 组断点集: $\{a', e, b, c'\}, \{a', e, b, d'\}, \{a', e, b, g'\}$ 。得到的断点集中的断点数为 4, 为最少断点数, 所以这些断点集即为最小断点集。

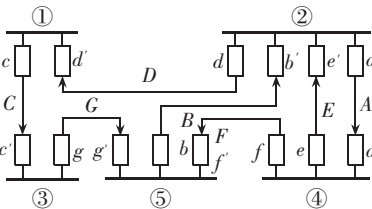


图 5 电力系统接线图(1)

Fig.5 The wiring diagram (1) of power system

图 6 为没有平行线路的网络 N_2 , N_2 为不可分连通图, 其最少断点数为 6。母线 1, 3, 4 出线最多均为 4, 下面是其寻求最小断点集的过程。

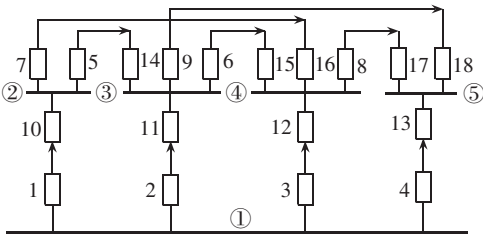


图 6 电力系统接线图(2)

Fig.6 The wiring diagram (2) of power system

a. 选择连接此 3 个节点(母线)的线路上同一端的保护作为断点, 即 $\{2, 3\}$ 或 $\{11, 12\}$, 这些保护所在的线路都发自节点 1。

b. 对断点 $\{2, 3\}$, 确定母线 3 的所有出线上与保护 2 有同样保护指向的保护, 即保护方向均指向母线 3。这些保护有 5, 18, 15; 同理确定母线 4 所有出线上与保护 3 有同样保护指向的保护 6, 7, 17。

c. 从 L_D 阵中删除断点 {2,3} 对应的两列和此两列非零的各行后,在新形成的 L_D 阵中求 5,18,15 对应列的非零元素个数即权值,各为 8,8,5。选权值最大的保护作为断点,即为 5,18;同理在 L_D 阵中求 6,7,17 对应列的权值分别为 6,7,7,因此选 7,17 为断点。将新选出的断点从 L_D 阵中删除后, L_D 为零阵。

d. 网络 N_2 的最小断点集为 {2,3,5,7,17,18}, 同理可以求出另外一组断点集为 {11,12,14,16,8,9}。

鉴于篇幅,以上两例的简单回路矩阵从略。

4 结论

本文利用图论方法提出了一些行之有效的原则,并在此基础上提出了一种新的确定最小断点集的方法。本文提出的方法具有如下优点:

a. 简单易操作,利用这些原则,可以将一个大的问题分解成几个小的子问题,降低了计算最小断点集问题的复杂度,并且可以在很多实际网络中人工确定出最小断点集;

b. 有效性,即使是对于一个大型的网络,本文提出的方法也可以快速确定出最小断点集;

c. 通用性,可以适用于很多实际网络的确定最小断点集工作,且可以用来改善现有的确定最小断点集的一些方法。

参考文献:

- [1] DUMBURG M J, RAMASWAMI R, VENKATA S S, et al. Computer aided transmission protection system design, part I: Algorithms[J]. *IEEE Trans. on Power App. Syst.*, 1984, 103(1): 51-59.
- [2] RAO V V B, RAO K S. Computer aided coordination of directional relays: Determination of break points[J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1988, 3(2): 545-548.
- [3] JENKINS L, KHINCHA H P, SHAJIVAKUMAR S, et al. An application of functional dependencies to the topological analysis of protection schemes[J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1992, 7(1): 77-83.
- [4] PRASAD V C, RAO K S P, RAO A S. Coordination of directional relays without generating all circuits[J]. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 1991, 6(2): 584-590.

- [5] 吕飞鹏, 米鳞书, 姜可熏. 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.
- LÜ Fei-peng, MI Lin-shu, JIANG Ke-xun. Neural approach to determine minimum break point set for optimal coordination of directional protective relays in multiloop networks[J]. *Proceedings of the CSEE*, 1997, 17(3): 184-189.
- [6] 乐全明, 顾永朋, 吕飞鹏. 基于 GA 的环网方向保护配合最小断点集的计算[J]. *继电器*, 2002, 30(8): 23-26.
- YUE Quan-ming, GU Yong-peng, LÜ Fei-peng. GA based determination of minimum break point set for optional coordination of directional protective relay in a multiloop network[J]. *Relay*, 2002, 30(8): 23-26.
- [7] MADANI S M, RIJANTO H. A new application of graph theory for coordination of protective relays [J]. *IEEE Power Engineering Review*, 1998, 18(6): 43-45.
- [8] MADANI S M, RIJANTO H. Protection coordination; determination of the break point set [J]. *IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib.*, 1998, 145(6): 717-721.
- [9] 李银红, 石东源, 段献忠, 等. 继电保护计算机整定的断点计算方法的改进[J]. *华中理工大学学报*, 1999, 27(7): 57-59.
- LI Yin-hong, SHI Dong-yuan, DUAN Xian-zhong, et al. The improvement of calculation method of break points in computer aided relay setting [J]. *J. Huazhong Univ. of Sci. & Tech.*, 1999, 27(7): 57-59.
- [10] 陈允平, 周泽昕, 李 强. 继电保护定值计算机计算中的图论新算法[J]. *电网技术*, 1995, 19(4): 31-37.
- CHEN Yun-ping, ZHOU Ze-xin, LI Qiang. The new graph algorithm for computer-aided design of protection system coordination [J]. *Power System Technology*, 1995, 19(4): 31-37.

(责任编辑: 李 玲)

作者简介:

冯 艳(1978-), 女, 河北邢台人, 硕士研究生, 研究方向为继电保护的新原理与新技术 (E-mail: fengyan789@sohu.com);

徐玉琴(1964-), 女, 河南开封人, 副教授, 主要从事电力系统继电保护与控制的教学、研究工作;

沈志强(1978-), 男, 浙江绍兴人, 硕士研究生, 研究方向为继电保护的新原理与新技术。

Determination of minimum break point set based on graph theory

FENG Yan, XU Yu-qin, SHEN Zhi-qiang

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: During the setting of protective relays in multi-loop network, the setting coordination sequence of directional over-current protection and distance protection must be decided, in which the determination of BPS (Break Point Set), as the starting points of setting calculation, is especially important. Some lemmas based on graph theory are presented to reduce the complexity of minimum BPS determination, such as network cutting, minimum break point number, disregard of the neighbor protection, symmetry, break-point selection for network without parallel, based on which all minimum BPSs are obtained step by step. The example shows that the proposed method reduces the complexity of the minimum BPS determination and is efficient and general.

Key words: multiloop network; setting coordination; break point set; graph theory