

电力系统多区域复杂环网的最小断点集计算

马静¹, 叶东华², 王彤¹, 王增平¹, 陈晓芳¹

- (1. 新能源电力系统国家重点实验室(华北电力大学), 北京市 昌平区 102206;
2. 福建省电力有限公司漳州电业局, 福建省 漳州市 363000)

Calculation of Minimum Break Point Set for Multi-area Complex Loop Network of Power System

MA Jing¹, YE Donghua², WANG Tong¹, WANG Zengping¹, CHEN Xiaofang¹

- (1. State Key Laboratory for Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources (North China Electric Power University), Changping District, Beijing 102206, China;
2. Zhangzhou Electric Power Bureau, Fujian Electric Power Company Limited, Zhangzhou 363000, Fujian Province, China)

ABSTRACT: In order to basically improve the minimum break point set (MBPS) to adapt to the non-predictive change level of system structure, a novel scheme of calculating and updating the MBPS for multi-area complex loop network was proposed in this paper. According to static network topology, the MBPSs of sub-area are parallel calculated based on the relay-incidence matrix. Then, the optimization calculation for the MBPS of main-area is calculated and the final MBPS of the whole network is obtained. When the network topology is varied, a single-area MBPS updating algorithm was firstly proposed based on the generalized break point set. Then the method was applied to rapidly update MBPS in the multi-area when the network topology of the sub-area, main-area or single-line connection node is varied. The typical test system with 5-area, 68-bus study demonstrates the proposed method has the following advantages. In the aspect of calculating MBPS, this method not only can guarantee the reasonability of the number of break points, but also can accelerate the calculation of MBPS. In the aspect of updating MBPS, this method is able to update the MBPS of the whole network only by dealing with the MBPS of the varied region. Furthermore, the method is adapted to a lot of variation conditions of network topology with less computational burden.

基金项目: 国家自然科学基金项目(50907021, 50837002); 中央高校基本科研业务费专项资金项目(11MG01, 09QX64); “111”引智计划项目(B08013)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50907021, 50837002); Project Supported by Chinese Universities Scientific Fund (11MG01, 09QX64); Project Supported by the “111” Project (B08013).

KEY WORDS: multi-area network; variation of network topology; minimum break point set (MBPS); relay incidence matrix; generalized break point set

摘要: 为从根本上改善最小断点集(minimum break point set, MBPS)适应系统结构非预设性变化的水平, 提出多区域复杂环网最小断点集求取及更新算法。在静态网络拓扑情况下, 利用保护关联矩阵并行计算各子区域的最小断点集, 在此基础上, 优化计算主区域的最小断点集, 并据此确定全网最小断点集。在网络变结构的情况下, 基于广义断点集提出单区域最小断点集更新方案, 并将其推广至多区域网络, 在主区域、子区域及单线路联络节点发生变结构情况下, 快速更新最小断点集。典型的5区域68节点系统计算结果表明: 该方法在最小断点集求取方面, 不但能够保证全网断点数目合理, 还能提高最小断点集的计算速度; 在最小断点集更新方面, 该方法仅需处理变结构所关联区域的最小断点集, 即可实现全网最小断点集更新, 有效地降低了复杂环网最小断点集更新的复杂性, 计算量小, 适用于多种网络变结构情况。

关键词: 多区域电网; 网络变结构; 最小断点集; 保护关联矩阵; 广义断点集

0 引言

最小断点集(minimum break point set, MBPS)的求取是复杂环网方向保护整定计算最关键的步骤之一^[1-2]。目前研究主要集中在单区域静态网络的MBPS求取上, 如图论法^[3-7]、保护依赖函数法^[8-12]、人工智能法^[13-18]等多种方法。在适应多区域复杂环网MBPS求取及更新方面则相对较少^[19], 主要有基于割节点或割支路的MBPS计算方法^[20-21]。为从根本上改善MBPS适应系统结构非预设性变化的水

平, 本文提出一种适用于多区域复杂环网变结构的 MBPS 求取及更新算法。一方面在静态网络拓扑情况下, 提出并行计算子区域、优化计算主区域的多区域网络 MBPS 计算方案, 该方案可在全网已有分区的基础上进行计算, 不需要重新分区; 并可在确保全网断点数目合理的情况下, 节约 MBPS 的求取时间。另一方面, 当网络发生变结构时, 在静态网络拓扑 MBPS 的基础上, 引入广义断点集分别制定主区域、子区域及单线路联络节点发生变化情况下 MBPS 的更新方案, 该方案仅需处理局部区域即可实现全网 MBPS 更新, 有效地降低了多区域环网 MBPS 更新的复杂性。5 区域 68 节点系统验证了该方案的正确性和有效性。

1 多区域网络最小断点集的求取算法

对含有 n 个子区域的复杂大电网, 其 MBPS 的计算步骤如下:

1) 形成全系统的保护关联矩阵 R 。假设有 m 个保护时, 保护关联矩阵的规模为 $m \times m$, 矩阵 R 中的元素可表示为

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{保护 } i \text{ 依赖于保护 } j \\ 0, & \text{保护 } i \text{ 不依赖保护 } j \end{cases} \quad (1)$$

式中 r_{ij} 为矩阵 R 中第 i 行第 j 列的元素 ($i=1, 2, \dots, m$; $j=1, 2, \dots, m$), m 为全网的保护数。若某线路由保护 i 和保护 k 组成, 线路两端的节点分别为 n_1 和 n_2 , 且 n_2 节点上除保护 k 外还有 x 个保护, 则称保护 i 依赖于这 x 个保护, 对应 $r_{ij}=1 (j=1, 2, \dots, x)$; 若网络中除这 x 个保护外还有 y 个保护 (包括保护 k), 则称保护 i 不依赖于这 y 个保护, 对应 $r_{ij}=0 (j=1, 2, \dots, y)$ 。利用式(1)遍历所有的保护, 可快速获取全系统的保护关联矩阵 R 。

2) 将 R 中的保护按其所属的区域进行重新排列, 将同区域保护对应的行列元素组合在一起。

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & R_{22} & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & R_{nn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: $R_{ii} (i=1, 2, \dots, n)$ 为子区域 i 的保护关联矩阵; $R_{ij} (i=1, 2, \dots, n, j=1, 2, \dots, n, \text{ 且 } i \neq j)$ 为子区域 i 与子区域 j 联络线的保护关联矩阵。利用 R 可形成各区域的保护关联矩阵。

3) 将 n 个子区域等效成 n 个节点。将子区域

$1, 2, \dots, i, \dots, n$ 分别当成节点, 对应的等效节点编号为 $1', 2', \dots, i', \dots, n'$ 。在等效节点形成后, 同区域引出的联络线可视为连接在同一个节点上。基于各等效节点以及联络线的信息, 利用式(1)即可求出主区域保护关联矩阵 R_z 。

4) 计算全网终端断点。终端线路作为系统的特殊线路, 其上的终端保护可以直接选取为断点。由于网络的划分是在分离终端线路之后的连通图基础上进行, 因此, 终端线路与分区无任何关系, 依据下式可计算保护的依赖度 s_i :

$$s_i = \sum_{j=1}^m r_{ij} \quad (3)$$

式中 s_i 为保护 i 的依赖度。利用式(3)计算全网保护关联矩阵 R 中 $s_i=0$ 的保护, 这些保护即构成了全网终端断点。

5) 基于各子区域的保护关联矩阵, 并行计算各子区域 MBPS。另外, 因步骤 4) 已计算出全网终端断点, 当计算子区域 MBPS 过程中出现 $s_i=0$ 的保护时, 无需再重新选为断点, 直接化简即可。

6) 优化计算主区域的 MBPS。首先将 R 中与全网终端断点或各子区域 MBPS 相关的元素置 0, 再利用式(3)将 R 中 $s_i=0$ 的保护组成保护界定集 U 。在此基础上, 将 R 中与 U 相关的元素置 0, 并判断当前 R 中是否存在 $s_i=0$ 的保护, 若存在, 则将此保护加入集合 U 中, 重复上述判断过程, 直至 U 中无新增元素为止。此时, U 中联络线保护就构成了主区域的保护界定集 U_z 。随后, 将主区域保护关联矩阵 R_z 中与 U_z 相关的元素删除, 再利用现有的 MBPS 求解方法^[12]即可获得主区域的 MBPS。

7) 确定全网的 MBPS。综合已获取的全网终端断点、各子区域 MBPS 和主区域 MBPS 可直接确定全网的 MBPS。

通过以上 7 个步骤, 可以实现并行计算子区域 MBPS、优化计算主区域 MBPS 的目标。

因停运、检修、扩建、运行方式变化等因素, 多区域网络可能在主区域、各子区域或联络线上投入或断开线路, 因此需要研究变结构情况下最小断点集的计算方法。

2 多区域网络最小断点集的快速更新算法

2.1 单区域网络投入线路情况下 MBPS 的更新算法

投入线路后, 主要任务为判断是否需要新增断

点。对于单区域网络,若投入终端线路,则直接将终端保护选为新增断点,并校验是否有可删除的初始断点。若投入非终端线路,则断点更新的算法为:

1) 基于初始网络保护关联矩阵 R , 利用式(1)增加 R 中与新增保护相对应的元素,即可得到当前网络的 R 。

2) 计算投入线路情况下的广义断点集 P 。广义断点集 P 是指当前网络中与发生变结构的线路不相关的保护集合,其具体计算过程如下:①将初始网络的断点归入集合 P ;②删除 R 中与集合 P 相关的元素;③利用式(3)判断当前 R 中是否存在 $s_i=0$ 的保护,若存在,则将此保护归入集合 P 并返回步骤②,重复此过程,直至 R 中无 $s_i=0$ 的元素为止,由此即可求出 P ,而网络中不属于集合 P 的保护则构成了集合 T 。

3) 重构保护关联矩阵 R 。

$$R = \begin{bmatrix} R_a & R_b \\ R_c & R_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: R_a 为 R 中行编号、列编号均由 P 中元素构成的矩阵块; R_b 为行编号由 P 中元素构成、列编号由 T 中元素构成的矩阵块; R_c 为行编号由 T 中元素构成、列编号由 P 中元素构成的矩阵块; R_d 为行编号、列编号均由 T 中元素构成的矩阵块。

R_a 、 R_b 、 R_c 这 3 个矩阵块包含 R 中与 P 相关的元素,而 R_d 则不包含 R 中与 P 相关的元素。 R 中与 P 相关的元素可视为已知,可以删除,而其他元素则需要保留。因此, R 可以化简为

$$R = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & R_d \end{bmatrix} \quad (5)$$

4) 利用现有 MBPS 的求取方案计算 R_d 所表征网络的断点,其结果即为变结构网络的新增断点。

5) 校验是否有可替代断点。若某原始断点仅依赖于新增断点或与其无关的保护,则称其为可替代断点,将其删除。

2.2 多区域网络投入线路情况下 MBPS 的更新算法

对于多区域网络,投入线路可划分为发生在子区域内部、主区域内部、单线路联络节点等 3 种情况。其中,单线路联络节点指该联络节点除所连的联络线外有且只有 1 条线路与其相连。针对变结构发生位置的不同,分别制定以下方案:

1) 子区域内部投入线路情况下的 MBPS 更新

方案。子区域内部投入线路可能发生在联络节点间、联络节点与非联络节点间、非联络节点间 3 种情况。利用单区域方案直接更新即可,若有多个子区域同时投入线路,则可并行更新。

2) 主区域内部投入线路情况下的 MBPS 更新方案。当不涉及联络节点时,将主区域的保护界定集和主区域的 MBPS 作为广义断点集,并利用单区域算法进行更新;当涉及到联络节点时,首先利用联络节点关联的保护信息更新主区域保护界定集,然后结合主区域的 MBPS 作为广义断点集,并利用单区域算法进行更新。

3) 单线路联络节点投入线路情况下的 MBPS 更新方案。子区域和主区域内部投入线路后,仅影响自身区域的 MBPS,但对于单线路联络节点投入线路的情况而言,其所关联的子区域和主区域的 MBPS 将同时受到影响。对于子区域,利用方案 1) 进行处理,对于主区域,利用方案 2) 进行处理。综合子区域和主区域的断点更新情况即可确定全网最终的断点。

2.3 单区域网络断开线路情况下 MBPS 的更新算法

断开线路情况下,需要判断是否可以减少断点。对于单区域网络,若断开断点线路,则直接将该断点删除,并校验是否有新增终端线路即可;若断开非断点线路,MBPS 具体更新过程为:

1) 断开线路时,类似投入线路时广义断点集的计算方法,首先将断开线路所安装的保护及初始的终端断点归入广义断点集 P ,删除 R 中与 P 相关的元素,然后利用式(3)将 $s_i=0$ 的保护加入 P ,重复此过程直至集合 P 无新增元素为止;

2) 校核 P 集合的保护情况,将其中的非终端断点删除;

3) 校验断开线路后当前网络是否存在新增线路,若有,则将对应的新增终端保护选为断点。

2.4 多区域网络断开线路情况下 MBPS 的更新算法

对于多区域网络,断开线路同样可分为发生在子区域内部、主区域内部、单线路联络节点等 3 种情况。当子区域内部或主区域内部断开线路时,将每个区域都当成一个单区域,然后利用单区域 MBPS 更新算法对变结构的区域进行处理。另外,校验新增终端线路时,需进一步确定该终端线路的类型,若为全网的终端线路,则将其终端保护选为断点;若为连接联络线的子区域终端线路,则其终

端保护不作为断点。

单线路联络节点断开线路将同时影响主区域和子区域，对于主区域，利用单区域算法进行更新；对于子区域，若新增全网终端线路，则将其终端保护选为断点，若未增全网终端线路，则无需改变该子区域的 MBPS。

本文所提的静态网络最小断点集计算方案在计算速度上较传统算法有一定提高，主要原因有以下 3 个方面：1) 新算法基于已有分区进行断点计算，且可适用于多种分区类型，避免了划分区域的复杂性及耗时性；2) 新算法采用并行方式计算全网终端断点及各子区域的断点，进一步地减少了断点的计算时间；3) 本文所提的变结构情况下最小断点集更新算法，只需更新与变结构相关联区域局部网络的断点集，而传统方法则是根据变结构后全网的拓扑结构进行断点的求取，相当于全局网络的求解。

另一方面，本文所提的算法能够很好地满足收敛性的要求。主要是因为：静态网络或变结构后网络的拓扑是确定的，其保护关联矩阵的维数等于保护总数，是一确定的有限值。通过断点选取原则的制定，优先选取特殊保护(终端线路、平行线)作为断点，最后依据保护依赖度的大小进行选取，由此可逐步确定全网的所有断点。当某一断点确定后，其在保护关联矩阵中对应的行、列即可删除；当所有断点确定后，保护关联矩阵被删减至 0。

3 实例分析

3.1 仿真系统

仿真系统如图 1 所示，文献[22]将该系统划分为 5 个子区域，共有 86 条线路。其中，子区域 1—5

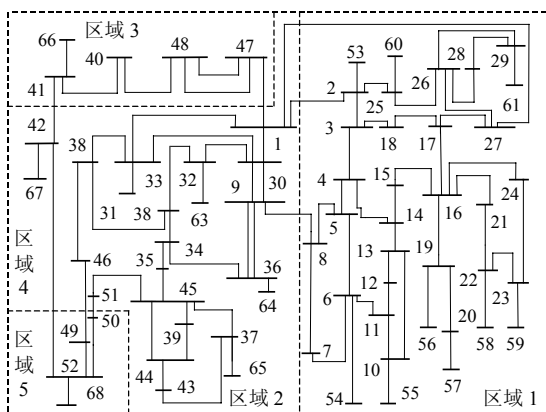


图 1 多区域电网结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram for multi-area network

所含的线路数目分别为 42、27、5、1、3；各子区域间共有 8 条联络线路，涉及 13 个联络节点。

在图 1 中，各节点编号为 1, 2, ..., f, f 为节点总数。此外，该系统所有线路与保护的相关信息如表 1 所示，其中：各线路编号为 1, 2, ..., h, h 为线路总数；各保护编号为 1, 2, ..., m, m 为保护总数。

3.2 MBPS 计算

如图 1 所示的多区域网络，利用式(1)、(2)可以分别得到全网保护关联矩阵 R 及各子区域的保护关联矩阵 R_{11} 、 R_{22} 、 R_{33} 、 R_{44} 、 R_{55} 。将子区域 1—5 分别等效成节点 1', 2', ..., 5'，与联络线构成主区域，具体结构如图 2 所示。主区域的相关信息如表 2 所示。

由表 2 可看出，保护 63 依赖于保护 65、150。则保护 63 所对应行、保护 65 对应列的元素为 1，保护 63 所对应行、保护 150 对应列的元素为 1，而保护 63 所对应行的其他元素则为 0，依次类推，利用式(1)可获得主区域的保护关联矩阵 R_z ：

$$R_z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

全网及各区域保护关联矩阵确定后，按以下步骤计算全网的 MBPS：

1) 利用式(1)将 R 中 $s_i=0$ 的终端保护选为断点，可得全网终端线路最小断点集 $M_1=\{71,72,73, 74,75, 76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86\}$ 。

2) 根据 R_{11} 、 R_{22} 、 R_{33} 、 R_{44} 、 R_{55} ，并行计算各子区域的断点，可得子区域 1 的最小断点集 $M_1=\{9, 21,22,23,24,31,32,93,98,100,105\}$ ；子区域 2 的最小断点集 $M_2=\{35,36,37,38,44,45,120,136,139, 141\}$ ；

表1 5区域68节点系统具体参数

Tab. 1 Detail parameters of the 5-area, 68-node system

线路编号	首节点号	末节点号	首保护号	末保护号	线路编号	首节点号	末节点号	首保护号	末保护号	线路编号	首节点号	末节点号	首保护号	末保护号
1	2	3	1	87	30	26	27	30	116	59	35	45	50	136
2	2	25	2	88	31	26	28	31	117	60	37	43	51	137
3	3	4	3	89	32	26	29	32	118	61	43	44	52	138
4	3	18	4	90	33	28	29	33	119	62	44	45	53	139
5	4	5	5	91	34	2	53	71	157	63	39	44	54	140
6	4	14	6	92	35	6	54	73	159	64	39	45	55	141
7	5	6	7	93	36	10	55	72	158	65	45	51	56	142
8	5	8	8	94	37	19	56	74	160	66	31	62	80	166
9	6	7	9	95	38	20	57	75	161	67	32	63	81	167
10	6	11	10	96	39	22	58	76	162	68	36	64	82	168
11	7	8	11	97	40	23	59	77	163	69	37	65	83	169
12	10	11	12	98	41	25	60	78	164	70	47	48	57	143
13	10	13	13	99	42	29	61	79	165	71	47	48	58	144
14	12	11	14	100	43	1	30	34	120	72	48	40	59	145
15	12	13	15	101	44	9	30	35	121	73	41	40	60	146
16	13	14	16	102	45	9	30	36	122	74	41	66	84	74
17	14	15	17	103	46	9	36	37	123	75	42	67	85	171
18	15	16	18	104	47	9	36	38	124	76	50	52	61	147
19	16	17	19	105	48	36	37	39	125	77	49	52	62	148
20	16	19	20	106	49	34	36	40	126	78	52	68	86	172
21	16	21	21	107	50	35	34	41	127	79	1	2	63	149
22	16	24	22	108	51	33	34	42	128	80	1	27	64	150
23	17	18	23	109	52	32	33	43	129	81	8	9	65	151
24	17	27	24	110	53	30	31	44	130	82	1	47	66	152
25	19	20	25	111	54	30	32	45	131	83	46	49	67	153
26	21	22	26	112	55	1	31	46	132	84	50	51	68	154
27	22	23	27	113	56	31	38	47	133	85	41	42	69	155
28	23	24	28	114	57	33	38	48	134	86	42	52	70	156
29	25	26	29	115	58	38	46	49	135					

表2 主区域具体参数

Tab. 2 Detail parameters of the main-area

线路编号	首等效节点号	末等效节点号	首保护号	末保护号
79	2'	1'	63	149
80	2'	1'	64	150
81	1'	2'	65	151
82	2'	3'	66	152
83	2'	5'	67	153
84	5'	2'	68	154
85	3'	4'	69	155
86	4'	5'	70	156

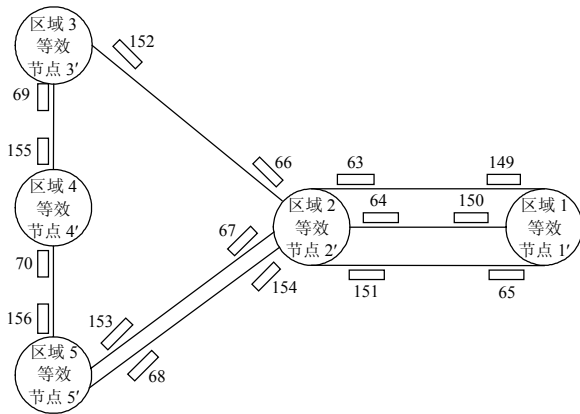


图2 主区域结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram for main-area

子区域3的最小断点集 $M_3=\{143,144\}$; 子区域4的

最小断点集 $M_4=\emptyset$ ；子区域 5 的最小断点集 $M_5=\emptyset$ 。

3) 由各子区域的 MBPS 得主区域的保护界定集 $U_z=\{65,67,68,155,156\}$ 。删除主区域保护关联矩阵 R_z 中与 U_z 相关的元素，在此基础上可计算出主区域最小断点集 $M_z=\{149,150,153\}$ 。主区域若不进行上述优化处理，而直接利用式(6)求取 M_z ，可得 $M_z=\{63,64,151,66,67,154\}$ 。该结果表明优化处理能够保证全网断点数目的合理性。另外，该方法与直接利用现有算法对多区域电网进行计算所得的断点数目一致。

基于全网终端断点、各子区域 MBPS 和主区域 MBPS 可以确定全网所有保护的配合顺序：一方面，全网终端断点及各子区域 MPBS 确定后，与联络线保护无关的保护配合顺序即可确定；另一方面，主区域 MBPS 确定后，与联络线保护相关的保护配合顺序即可确定。同时，这也表明全网终端断点、各子区域 MBPS 和主区域 MBPS 之和即全网的 MBPS。

以本文所举的系统为例， $M_1、M_1-M_5、M_z$ 之和为集合 $\{71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,9,21,22,23,24,31,32,93,98,100,105,35,36,37,38,44,45,120,136,139,141,143,144,149,150,153\}$ ，断点总数为 42 个。将此作为保护相关矩阵的第 1 层代入网络，依次可确定其他保护的配合顺序，共有 21 个层次，具体每层的保护个数如表 3 所示。由表 3 可看出，各层保护总数为 172 个，即全网所有保护的配合顺序均已确定，这表明 $M_1、M_1-M_5、M_z$ 之和就是全网的 MBPS。

表 3 保护相关顺序表

Tab. 3 Relay relative sequential table

配合层次	保护个数	配合层次	保护个数	配合层次	保护个数
1	42	8	7	15	2
2	10	9	11	16	3
3	10	10	10	17	5
4	7	11	12	18	4
5	6	12	11	19	3
6	8	13	7	20	1
7	6	14	6	21	1

3.3 投入线路情况下 MBPS 的更新

1) 子区域投入线路的情况。

以子区域 1 为例进行分析，该区域中节点 2、8 为联络节点，节点 3、4、16 为非联络节点。根据

子区域内投入线路的分类可知：线路 2-8 为联络线节点间变结构类型；线路 4-8 为联络线节点与非联络线节点间变结构类型；线路 3-16 为联络线节点与非联络线节点间变结构类型。子区域分别投入一条线路后(假设新增线路两端保护号分别为 173 和 174)，MBPS 的更新情况如表 4 所示。

表 4 子区域 1 内部投入线路的断点更新情况

Tab. 4 Result of updated MBPS when a line is added in the sub-area 1

新增线路	新增断点号	可替代断点号	全网断点数
线路 2-8	3,87	23	43
线路 4-8	102,174	—	44
线路 3-16	174	—	43

2) 主区域投入线路情况。

以线路 4-9 和 4-30 为例进行分析，其中，线路 4-9 为涉及初始联络节点的变结构类型，线路 4-30 为不涉及初始联络节点的变结构类型。这 2 种情况下，MBPS 更新结果如表 5 所示。

表 5 主区域内部投入线路的断点更新情况

Tab. 5 Result of updated MBPS when a line is added in the main-area

新增线路	主区域广义断点集	新增断点号	可替代断点号	全网断点数
线路 4-9	67,68,155,156,149,150,153	65,173	—	44
线路 4-30	65,67,68,155,156,149,150,153	173	—	43

3) 单线路联络节点投入线路的情况。

全网单线路联络节点有 46、49、50、51，以节点 46 和 51 间投入一条线路(假设新增线路两端保护号分别为 173 和 174)为例，投入线路将同时影响子区域 2 和主区域。对于子区域 2，当成内部投入线路，采用单区域方案更新可得新增断点 42，子区域 2 更新后的最小断点集可表示为 $\{35,36,37,38,120,44,45,136,139,141,42\}$ 。对于主区域，联络节点 46 和 51 关联的保护为 $\{67,68,153,154\}$ ，主区域的广义断点集 $P_z=\{65,155,156,149,150,153\}$ ，在此基础上，可计算出新增断点 68，因此，更新后的主区域最小断点集可表示为 $\{149,150,153,68\}$ 。综合主区域和各个子区域的 MBPS，可知变结构后全网断点数为 44 个。

子区域、主区域及单线路联络节点投入线路等 3 种情况下，进一步利用现有 MBPS 求取方法计算

网络变结构后的断点数目,结果表明利用本方案更新 MBPS 与直接采用现有方法计算 MBPS 所得全网最终断点数目完全一致,这表明本方案正确、有效。

3.4 断开线路情况下 MBPS 的更新

1) 子区域内部断开线路。

以子区域 1 中线路 24、32、8、15 为例进行分析。其中,线路 24、32 为断点所在线路,线路 8、15 为非断点所在线路。子区域在断开这些线路后,MBPS 的更新情况如表 6 所示。

表 6 子区域 1 内部断开线路的断点更新情况
Tab. 6 Result of updated MBPS when the line of is deleted in the sub-area 1

断开线路编号	可删除断点号	新增终端保护号	全网断点数
24	24	—	41
32	31,32	—	40
8	9	—	41
15	100	100	42

2) 主区域断开线路的情况。

当断开断点所在线路 80 后,直接将线路 80 上的断点 150 去除,无新增保护,因此,主区域最小断点集更新为{149,153}。当断开非断点线路 81 后,经校验知其无可替代的断点,也无新增断点,因此,主区域最小断点集更新为{149,150,153}。

3) 单线路联络节点断开线路的情况。

单线路联络节点有 46、49、50、51,以线路 83 为例进行说明。断开该线路将同时影响主区域、子区域 2 和子区域 5。对于主区域而言,线路 83 上的保护 153 为初始断点,可直接删除,经校验知其无新增终端线路,因此,主区域最小断点集可更新为{149,150},断点数目减少 1 个。对于子区域 2 而言,断开线路 83 后,线路 58 成为新增终端线路,因此,线路 58 上的保护 49 需选为新增断点,子区域 2 更新后的最小断点集可表示为{35,36,37,38,120,44,45,136,139,141,49},断点数目增加 1 个。对于子区域 5 而言,线路 77 成为新的终端线路,同理可将保护 148 选为新增断点,更新后子区域 5 的最小断点集可表示为{148},断点数目增加 1 个。综合主区域和各个子区域的 MBPS,可知变结构后全网的断点数目为 43 个。

子区域、主区域及单线路联络节点分别断开断点线路或非断点线路的情况下,进一步利用现有 MBPS 求取方法计算网络变结构后的断点数目,结果表明,利用本方案更新 MBPS 与直接采用现有方

法计算 MBPS 所得全网最终断点数目完全一致。该结果再次验证了本方案的正确性和有效性。

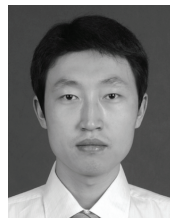
4 结论

本文提出了多区域复杂环网 MBPS 的求取和更新方案。在静态拓扑结构情况下,利用保护关联矩阵提出了子区域并行计算、主区域优化计算的 MBPS 求取算法,该算法可与电网实际的物理分区相结合,无需重新分区,既保证了全网断点数目的合理性,又加快了 MBPS 的求取速度。在网络变结构情况下,利用网络初始 MBPS,基于广义断点集分别制定了子区域、主区域及单线路联络节点发生变结构时的 MBPS 更新算法,该算法不受原始网络最小断点集求取算法的限制,仅需更新局部区域即可实现全网 MBPS 的快速更新,计算量小,适用于多种网络变结构情况。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 曹国臣,蔡国伟,王海军. 继电保护整定计算方法存在的问题与解决对策[J]. 中国电机工程学报, 2003, 21(10): 51-56.
Cao Guochen, Cai guowei, Wang Haijun. Problems and solutions in relay setting and coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 21(10): 51-56(in Chinese).
- [3] 李银红,段献忠. 继电保护整定计算中形成简单回路的方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 20-25.
Li Yinhong, Duan Xianzhong. Study on the simple loop formation method in relay coordination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 20-25(in Chinese).
- [4] 乐全明,郁惟镛,吕飞鹏. 多环电网方向保护整定计算中形成有向简单回路的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 4(8): 36-40.
Yue Quanming, Yu Weiyong, Lü Feipeng. A new algorithm to determine directional dimple loops during setting and calculating of directional relays protection in a multi-loop electric power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 4(8): 36-40(in Chinese).
- [5] 杨雄平. 电力系统网络拓扑结构分析及运行方式组合研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
Yang Xiongping. Study on network topology analysis and operation modes combination in power system [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2007(in Chinese).
- [6] Lin Henming, Zhou Jingyang. On computing the

- minimum feedback vertex set of a directed graph by contraction [J]. IEEE Trans. on Computer-aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2000, 19(3): 295-307.
- [7] Keil T, Jäger J. Advanced coordination method for overcurrent protection relays using nonstandard tripping characteristics[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2008, 23(1): 52-57.
- [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. Liu Dan, Lü Feipeng. A novel method for determining minimum break point set based on network graph simplification and coordination relationships of relays [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(16): 24-27(in Chinese).
- [9] Kargar H K, Abyaneh H A, Ohis V, et al. Pre-processing of the optimal coordination of overcurrent relays [J]. Electric Power System Research, 2005(75): 134-141.
- [10] Shateri H, Jamali S. Improved functional dependency method to break-point determination for protective system coordination[C]//Proceedings of the International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, New Jersey: IEEE Power and Energy Society, 2007: 493-498.
- [11] 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. Lü Feipeng. A novel method for determining the optimal coordination sequence of directional relays in a complicated multi-loop power networks based on coordination relationships of relays[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 65-69(in Chinese).
- [12] Ye Donghua, Ma Jing, Wang Zengping. A novel method for determining minimum break point set based on network reduction and relay incidence matrix[C]//Fifth International Conference on Critical Infrastructure, New Jersey: IEEE Power and Energy Society, 2010: 19-21.
- [13] 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. Lü Feipeng, Mi Linshu, Jiang Kexun. 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(in Chinese).
- [14] Sharifian H, Abyaneh H A, Salman S K, et al. Determination of the minimum break point set using expert system and genetic algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3): 1284-1295.
- [15] 陈绩, 吕飞鹏, 黄姝雅. 确定复杂环网方向保护最小断点集的改进离散粒子群优化算法[J]. 电网技术, 2008, 32(12): 90-94. Chen Ji, Lü Feipeng, Huang Shuya. An improved discrete particle swarm optimization algorithm to determine minimum break point set of directional protection for multi-loop network[J]. Power System Technology, 2008, 32(12): 90-94(in Chinese).
- [16] Noghabi A S, Sadeh J, Mashhadi H R. Considering different network topologies in optimal overcurrent relay coordination using a hybrid GA[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 1857-1863.
- [17] Razavi F, Abyaneh H A, Al-dabbagh M, et al. A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination[J]. Electric Power System Research, 2008, 78(4): 713-720.
- [18] Gajbhiye R K, De A, Soman S A. Computation of optimal break point set of relays: an integer linear programming approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(4): 2087-2098.
- [19] 宋少群. 基于广域网和多 Agent 的电网自适应协调保护的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2007. Song Shaoqun. Research on multi-Agent and wan based adaptive coordinated protection[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2007(in Chinese).
- [20] 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 Dongyuan, Duan Xianzhong, et al. The improvement of calculation method of break points in computer aided relay setting[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1999, 27(7): 57-59(in Chinese).
- [21] 陈绩, 吕飞鹏, 黄姝雅. 复杂环网保护配合的网络分割新算法[J]. 继电器, 2006, 34(23): 6-10. Chen Ji, Lü Feipeng, Huang Shuya. A novel algorithm for network partition of relay coordination in a complicated multi-loop power networks[J]. Relay, 2006, 34(23): 6-10(in Chinese).
- [22] Rogers G. Power system oscillations[M]. USA: Kluwer Academic Publishes, 2000: 108-115.



马静

收稿日期: 2011-03-03。

作者简介:

马静(1981), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护、稳定与控制, hdmajing@yahoo.com.cn;

叶东华(1985), 男, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护;

王彤(1985), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统继电保护。

(责任编辑 谷子)