

基于保护矩阵和网络化简的最小断点集计算新方法

张向亮 徐文 姚强

(国网景德镇供电公司,江西 景德镇 333000)

摘要: 针对基于网络化简和保护配合关系的最小断点集(MBPS)计算方法所出现的多组同基 MBPS 问题,提出了一种基于保护三类矩阵(即保护重要度矩阵、保护归属矩阵、保护关联矩阵)和网络化简的 MBPS 求取方法,并以保护归属矩阵来解决网络的平行线路判据问题。该方法先形成保护三类矩阵,再以化简步骤对其进行动态调整,并按照断点选取原则选取断点,能够获取最优 MBPS。最后通过算例验证了该算法的可行性和有效性。

关键词: 最小断点集; 网络化简; 保护矩阵; 保护重要度矩阵; 保护归属矩阵; 保护关联矩阵

Abstract: Aiming at the problems of multi-group with the same cardinal number which emergences in a method for determining minimum break point set (MBPS) based on network reduction and coordination relationships of relays, a method for determining MBPS based on three types of relay matrix (relay-importance matrix, relay-belong matrix, relay-incidence matrix) and network reduction is proposed, and the relay-belong matrix is used to solve the criterion of parallel lines in grid. Firstly, this method needs to form three types of relay matrix, then adjust them dynamically according to the simplification steps, and select the break points according to break points selecting rules, which can obtain the optimal MBPS. Finally, the feasibility and validity are proved with the example of simulation.

Key words: minimum break point set (MBPS); network reduction; relay matrix; relay-importance matrix; relay-belong matrix; relay-incidence matrix

中图分类号: TM771 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2014)02-0031-05

0 前言

求取最小断点集是复杂环网方向保护整定计算的核心问题。已有计算方法^[1-2]一次计算只能随机得到最小断点集(minimum break point set, MBPS)的一个解,此解具有多样性问题。断点整定原则具有特殊性,不与相邻保护配合整定,存在误动的可能,若断点保护在系统中处于较重要位置,则系统故障时,其误动会对系统安全稳定运行产生较大影响。故在确保断点集基数最小的前提下,尽量选取重要度低的保护作为断点,以减小故障时断点对系统的影响。基于网络化简和保护配合关系的 MBPS 求取方法^[1],平行线路判据是其算法核心之一,由于在网络化简过程中仅依赖动态的保护配合关系,没有能够有效利用网络节点支路拓扑联接信息,对平行线路判据存在缺陷,在实际应用中对某些大型复杂网络无法求出 MBPS。文献[2]提出从多组同基 MBPS 中选取最优解的解决方法,但是所提指标不

能全面衡量保护重要度,存在局限性,且需利用文献[1]的方法求出多组 MBPS 之后再基于选优指标从中选取一组,算法较为复杂,计算量较大,平行线路判据问题也未解决。故有必要对文献[1]、文献[2]中的算法进行改进和完善。

以节点重要度和线路介数评估保护重要度,形成保护三类矩阵,以保护归属矩阵判断平行线路,以保护关联矩阵计算保护入度和出度,以保护重要度矩阵作为选取断点的依据之一,以化简步骤对其进行动态调整,并按断点选取原则选取断点,通过算例可获取最优 MBPS。

1 保护矩阵

1.1 保护重要度矩阵

形成该矩阵之前需评估各保护重要度,下面综合节点重要度和线路介数进行衡量。

1.1.1 节点重要度

节点 k 的重要度定义为^[2]

$$I(k) = 1 - \frac{\eta(G)}{\eta(G(k))} \quad (1)$$

式中 $\eta(G)$ 为网络 G 的凝聚度; $\eta(G(k))$ 为节点 k 收缩后所得网络 $G(k)$ 的凝聚度。

为了将节点重要度和下节的线路介数综合应用于评估保护在系统中的重要度,需对其进行归一化处理,使之具有可参照性。将节点 k 的重要度与所有节点的重要度之和的比值定义为节点 k 的归一化重要度为

$$\tilde{I}(k) = \frac{I(k)}{\sum_{i=1}^n I(i)} \quad (2)$$

式中 $I(k)$ 与 $I(i)$ 分别为节点 k 、节点 i 归一化前的重要度。

1.1.2 线路介数

最短电气路径和最短电气距离的概念见文献[3],使用有权电网模型中的边权连接矩阵,利用 Dijkstra 最短路径算法可以找出网络中任意两节点之间的最短电气路径^[4]。

介数^[5]反映了边在整个网络中的作用和影响力,其值为网络中经过该边的最短路径个数。将线路 s 的介数 $\beta(s)$ 定义为电网中经过该线路的最短电气路径个数为

$$\beta(s) = \sum_{i \in V, i \neq j} N_{ij}(s) \quad (3)$$

式中 $N_{ij}(s)$ 为任意节点 i 与节点 j 之间最短电气路径经过线路 s 的次数。

将线路 s 的介数与所有线路的介数之和的比值定义为线路 s 的归一化介数为

$$\tilde{\beta}(s) = \frac{\beta(s)}{\sum_{r=1}^m \beta(r)} \quad (4)$$

式中 $\beta(s)$ 、 $\beta(r)$ 分别为线路 s 、线路 r 归一化前的介数。

1.1.3 保护重要度

为评估保护在系统中的重要度,以节点重要度和线路介数对其进行综合衡量,定义保护 t 的重要度为

$$\lambda(t) = \tilde{I}(k) + \tilde{\beta}(s) \quad (5)$$

式中 $\tilde{I}(k)$ 表示与保护 t 关联的节点 k 的归一化重要度; $\tilde{\beta}(s)$ 表示保护 t 所保护的线路 s 的归一化介数。

与保护关联的节点归一化重要度以及所保护的线路归一化介数越大,则该保护重要度越大。应优

先选择重要度低的保护作为断点,这样能降低断点保护对系统稳定运行的影响。

由式(3)、(4)、(5)算出全网各保护的重要度,组成保护重要度矩阵 I 。

$$I = [t_1 \quad t_2 \quad \dots \quad t_v \quad \dots \quad t_n]^T \quad (6)$$

式中 t 为保护重要度; v 为编号; n 为保护总数。

1.2 保护归属矩阵

保护归属矩阵用于描述保护关关节点和支路,且其元素随网络化简而动态调整。该矩阵行号为节点编号,列号为线路编号。若保护 r 在节点 n 和线路 l 交汇处,则第 n 行第 l 列为 r ,若 n 与 l 间无直接拓扑连接,则第 n 行第 l 列为 0。图 1 的保护归属矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3 & 0 & 4 & 5 \\ 6 & 0 & 7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 8 & 9 & 10 \end{bmatrix}$$

1.3 保护关联矩阵

保护关联矩阵用于描述保护间的相互配合关系,且其元素也随网络化简而动态调整。该矩阵元素定义如下。

$$\begin{cases} a_{ij} = 1 & \text{保护 } i \text{ 需与保护 } j \text{ 配合} \\ a_{ij} = 0 & \text{保护 } i \text{ 不需与保护 } j \text{ 配合} \end{cases} \quad (7)$$

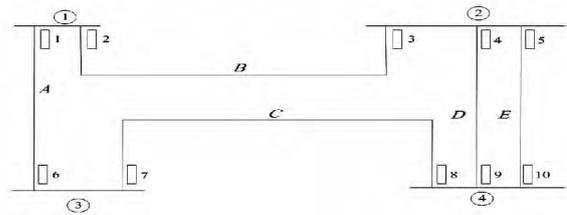


图 1 简单电力系统

根据定义,图 1 的保护关联矩阵如下。

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

保护 i 的入度(In-degree)等于依赖于保护 i

的后备保护个数,其出度(Out-degree)等于保护*i*依赖的主保护个数。该矩阵第*i*行所有元素之和即为其出度,简称*Od*,第*i*列所有元素之和即为其入度,简称*Id*。从上面的保护关联矩阵可知:保护5的*Od*为2,*Id*为2。

2 网络化简

2.1 化简原则

对应于有向图的网络化简原则^[1,6]并基于保护三大矩阵,对网络进行化简,其化简原则和顺序如下。

①对于*Id*或*Od*为0或被选为断点的保护,把保护三大矩阵中与其关联的元素置0。终端线路首端保护出度为0,将其选为断点。②对于*Id*为1的保护*t*,若保护关联矩阵的第*t*列的非0元素在第*j*行且*t*≠*j*,则把保护关联矩阵第*t*行元素赋予第*j*行,并将第*t*行全赋0,保护重要度矩阵第*t*个元素置0,保护归属矩阵中为*t*的元素替换为*j*。③对于出度为1的保护*t*,保护关联矩阵的第*t*行的非零元素在第*j*列且*t*≠*j*。把保护关联矩阵第*t*列元素赋予第*j*列,并将第*t*列全赋0,保护重要度矩阵第*t*个元素置0,保护归属矩阵中为*t*的元素替换为*j*。④对于保护*t*,若保护关联矩阵第*t*行第*t*列为1,将其选为断点,并把保护三大矩阵中与保护*t*关联元素置0。

2.2 平行线路优化^[1,7]

定义1,电网拓扑图中直接连接两个母线节点的2条及以上的线路称为平行线路。

定义2,对于平行线路两端的保护,任意一端的所有保护构成的集合称为一组平行线路保护对。

定义3,在同一条母线上,两组及以上平行线路保护对构成强关联平行线路保护组。

定义4,对于两组平行线路保护对,其所在两母线间仅由一条线路相连,称其为弱关联平行线路保护组。

为解决文献[1]平行线路判据问题,提出以归属矩阵判断网络平行线路、平行线路保护对、强关联平行线路保护组、弱关联平行线路保护组。

从归属矩阵中归纳平行线路判据:两列或多列

任意同行元素或同为0,或同不为0(至少一行),则对应的线路为平行线路。但是仍有问题,如图2所示。图2(a)、(b)的保护归属矩阵分别如下所述。

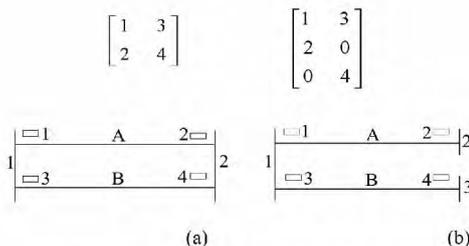


图2 比较图

图2(a)线路A和B平行,而图2(b)线路A和B不平行。若图2(a)、(b)中的保护2、4均被选为断点,按化简原则,两个归属矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

以上述判据判断图2(a)、(b)中的线路均为平行线路,但图2(b)线路实际不平行。故有必要纠正该判据,加一个化简原则:平行线路上的保护被选为断点或者被删除则归属矩阵对应位置的元素为-1。故平行线路的判据为在归属矩阵中,两(多)列有两行同不为0且同不为-1,或者一行同不为0且同不为-1而另一行同为-1,则这些列对应的线路为平行线路。

按此原则化简,则图2(a)、(b)的归属矩阵为

$$\begin{bmatrix} 1 & 3 \\ -1 & -1 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} 1 & 3 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

以纠正后的判据判断:图2(a)线路平行,而图2(b)线路不平行。

其他概念判据如下。

平行线路保护对判据:由上述判据求出平行线路,其中同行非0且非-1元素对应的保护构成一组平行线路保护组。

强/弱关联平行线路保护组判据:以平行线路保护对所在行号为依据,若有两组或多组平行线路保护对在保护归属矩阵中非0且非-1元素对应行号相同,则其构成一组强关联平行线路保护组;若有两组平行线路保护对在保护归属矩阵中非0且非-1元素所在行号不同,且两行中同列非0且非-1元

素仅有一组相同,则其构成一组弱关联平行线路保护对。

3 断点选取原则

①原则 1: 把终端线路首端保护选为断点。②原则 2: 把强关联平行线路保护组中的所有保护选为断点并更新平行线路保护对。③原则 3: 把 I_d 最大的平行线路保护对选为断点,若存在多组,则把保护重要度之和最小的一组选为断点并更新平行线路保护对。④原则 4: 把弱关联平行线路保护组中的一个平行线路保护对选为断点(按原则 3 选取),若存在多组,则考虑所关联母线所包含的保护个数最小的一组,若此时有多组该类平行线路保护组,则考虑保护重要度之和最小的一组,再按上述方法选择断点,并更新平行线路保护对。⑤原则 5: 选择 I_d 最大的保护为断点,若最大 I_d 的保护有多个,则选取重要度最大的保护为断点。

4 算法步骤

这里算法步骤如下: ①根据式(2)、(4)、(5)计算全网各保护的重要度。②形成保护归属矩阵、保护关联矩阵、保护重要度矩阵并初始化 BPS 为空集。③若存在 $Od = 0$ 的保护,则运用原则 1 将其选为断点。④简化网络并更新保护三大矩阵。⑤若保护归属矩阵为空(即不包含非 0 且非 -1 元素)则结束。⑥若无平行线路,则运用原则 5 添加新断点到 BPS,再转至步骤④。⑦若存在强关联平行线路保护组,运用原则 2 添加新断点到 BPS。⑧若存在平行线路保护对而存在强关联平行线路保护组,则运用原则 3 添加新断点到 BPS。⑨若存在弱关联平行线路保护组,运用原则 4 添加新断点到 BPS 并转至步骤④; 否则直接转至步骤④。

5 算例分析

系统接线及保护分布如图 3 所示。基于所提计算方法,可求解该网络的最优 MBPS。

根据公式(5)算出网络中 38 个保护的重要度,如表 1 所示。根据系统接线图可得初始的保护重要

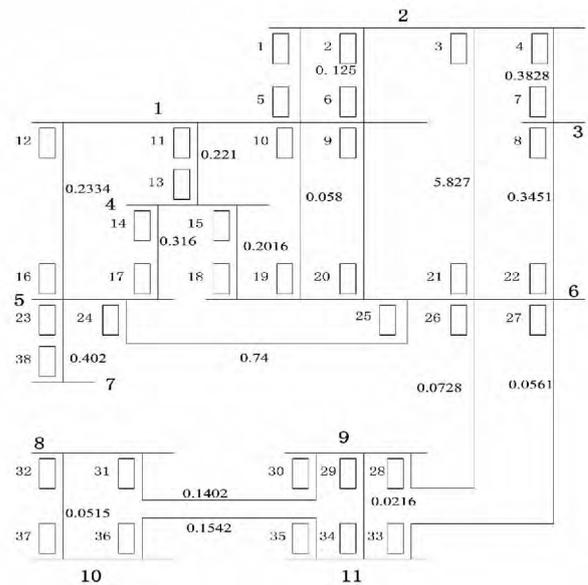


图 3 算例系统

度矩阵、保护归属矩阵、保护关联矩阵,并设置 $BPS = \{\}$ 。

①保护 23 的 $Od = 0$, 将其选为断点并同步更新保护三类矩阵, $BPS = \{23\}$; 保护 7、8、31、32、36、37 的入度均为 1, 以化简原则 2 更新三类矩阵; 化简后, 平行线路保护集为 $\{1, 2\}$ 、 $\{5, 6\}$ 、 $\{3, 4\}$ 、 $\{21, 22\}$ 、 $\{9, 10\}$ 、 $\{19, 20\}$ 、 $\{29, 30\}$ 、 $\{34, 35\}$ 其中 $\{1, 2\}$ 、 $\{3, 4\}$ 构成一组强关联平行保护对, 将保护 1、2、3、4 选为断点, 同时更新三类保护和平行线路保护集合, $BPS = \{23, 1, 2, 3, 4\}$ 。②这时, 平行线路保护集为: $\{9, 10\}$ 、 $\{19, 20\}$ 、 $\{29, 30\}$ 、 $\{34, 35\}$ 。其中 $\{19, 20\}$ 、 $\{29, 30\}$ 构成弱关联平行保护对, 根据断点选取原则 4 选保护 19、20 作为断点, 并更新三类保护和平行线路保护集合, $BPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20\}$ 。③这时, 平行线路保护集为: $\{29, 30\}$ 、 $\{34, 35\}$ 。保护 11、12 的入度为 1, 以化简原则 2 更新三类矩阵; 保护 29、30、34、35 的入度均为 2, 但是 $\{29, 30\}$ 的保护重要度之和的平均值小于 $\{34, 35\}$ 的, 故选 29、30 作为断点, 更新三类矩阵, $BPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30\}$ 。④此时, 不存在平行线路, 保护 33 的入度为 0, 按化简原则 1 更新三类矩阵; 保护 34、35 的入度为 1, 以化简原则 2 更新三类矩阵, 保护 27 的出度为 1, 再以化简原则 2 更新三类矩阵, 出现自环顶点 28, 将其选为断点, 以化简原则 4 更新三类矩阵, $BPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30, 28\}$ 。⑤此时, 网络中无平行线路, 按原则 3 选择断点。保护

13、14、16、17 的入度均为 2 ,而保护 13、14 的保护重要度最小 , $BPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30, 28, 13\}$ 或者 $\{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30, 28, 14\}$ 并同时更新三类矩阵。⑥若把保护 13 选为断点 ,保护 9、10、17、24 的入度均为 1 ,以化简原则 2 更新三类矩阵 ,保护 15、18 的出度均为 1 ,以化简原则 3 更新三类矩阵 ,出现自环顶点 14、25 将其选为断点 ,以化简原则 4 更新三类矩阵 ,网络只存在顶点 16 ,保护归属矩阵为空 ,算法结束 , $MBPS = \{23, 1, 2, 3, 4, 19, 20, 29, 30, 28, 13, 14, 25\}$ 。同理 ,若把 14 选为断点 ,得到的 MBPS 是相同的。

表 1 算例系统中所有保护的重要度

保护	重要度	保护	重要度	保护	重要度	保护	重要度
1	0.149 8	11	0.126 5	21	0.218 2	31	0.117
2	0.149 8	12	0.235 9	22	0.288 5	32	0.054 5
3	0.079 5	13	0.110 4	23	0.224 6	33	0.169 3
4	0.087 3	14	0.110 4	24	0.146 5	34	0.083 3
5	0.181 2	15	0.141 7	25	0.218 2	35	0.130 2
6	0.181 2	16	0.271 5	26	0.327 6	36	0.117
7	0.070 5	17	0.162 1	27	0.327 6	37	0.054 5
8	0.133 0	18	0.265 1	28	0.169 2	38	0.152 4
9	0.290 6	19	0.397 9	29	0.083 2		
10	0.290 6	20	0.397 9	30	0.130 1		

6 结 语

提出基于网络化简和保护三类矩阵求取 MBPS 计算方法 ,解决了平行线路判据问题 ,弥补了已有算法的不足。基于矩阵运算 ,效率高效 ,能够实时反映

网络拓扑结构的变化 ,符合电力系统实际情况。最后通过算例分析 ,证明所提算法的有效性和可行性。

参考文献

[1] 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.

[2] 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 ,12(34) : 58 - 60.

[3] 曹一家 ,陈晓钢 ,孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路识别[J]. 电力自动化设备 ,2006 ,26(12) : 1 - 5 ,31.

[4] 乐阳 ,龚健雅. 最短路算法的一种高效率实现[J]. 武汉测绘科技大学学报 ,1999 ,24(3) : 209 - 212.

[5] 王亮 ,刘艳 ,顾雪平 ,等. 综合考虑节点重要度和线路介数的网络重构[J]. 电力系统自动化 ,2010 ,34(12) : 29 - 33.

[6] LIN Henming ,JOU 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] Donghua Ye ,Jing Ma ,Zengping Wang. A Novel Method for Determining Minimum Break Point Set Based on Network Reduction and Relays Incidence Matrix[C]. Critical Infrastructure (CRIS) ,2010 5th International Conference on 2010: 1 - 5.

作者简介:

张向亮(1987) ,硕士 ,主要研究方向为电力系统继电保护。

(收稿日期:2013 - 11 - 11)

(上接第 5 页)

[9] 胡广书. 现代信号处理教程[M]. 北京:清华大学出版社 ,1999.

[10] 何书元. 应用时间序列分析[M]. 北京:北京大学出版社 ,2003: 139 - 143.

[11] 任震. 小波分析及其在电力系统中的应用[M]. 北京:中国电力出版社 ,2003.

[12] 葛哲学 ,陈仲生. Matlab 时频分析技术及其应用[M]. 北京:人民邮电出版社 ,2006.

[13] 董新洲 ,贺家李 ,葛耀中. 小波变换在行波故障检测中的应用[J]. 继电器 ,1998 ,26(5) : 1 - 4.

作者简介:

郑莹莹(1986) ,硕士研究生 ,研究方向为现代信号处理与电力系统故障信号分析;

舒勤(1958) ,教授 ,研究方向为现代信号处理与智能电网。

(收稿日期:2013 - 12 - 16)