

复杂环网保护配合的网络分割新算法

陈绩,吕飞鹏,黄姝雅

(四川大学电气信息学院,四川成都 610065)

摘要: 对大规模复杂环网预先进行网络分割是降低最小断点集问题计算复杂性的有效途径。根据复杂环网拓扑联接的特点,提出了一种基于节点邻接矩阵的割节点辨识与网络分解新算法。该算法利用改进的广度优先搜索技术,通过搜索简化后的节点邻接矩阵能快速找到割节点,同时将复杂环网分解为若干小的子网,大大降低了求解最小断点集的复杂性。给出的详细算例证明了该算法的正确性和实用性。

关键词: 电力系统; 保护整定计算; 最小断点集; 割节点; 网络分解; 节点邻接矩阵

中图分类号: TM771 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)23-0006-05

0 引言

国民经济的快速发展对电力系统可靠性提出了越来越高的要求,网际互联不断增强,电网规模的日益扩大增加了求解环网方向保护最优配合问题的难度。

求解最小断点集 MBPS (Minimum Break Point Set)是确定环网方向保护最优配合顺序的前提。近年来,国内外提出的求解最小断点集的算法主要分为两类:基于图论的算法^[1~5]和基于保护配合依赖关系^[6,7]的算法。基于图论方法中求解所有有向基本回路和计算最小断点集两个关键步骤都是具有指数复杂性的 NP 完全问题^[4~6],即不可能在多项式计算时间下得到最优解,所以当电网规模扩大到一定程度后,其计算量是难以接受的。而基于保护配合依赖关系的方法大大减小了计算的复杂度,但在计算大规模复杂环网时,因候选断点集中往往出现多个配合依赖优先级相同的保护而难以保证始终得到最优解^[6,7]。

对大规模复杂环网预先进行网络分割是降低电网计算复杂性的有效途径^[8,9]。对复杂环网求解最小断点集,在结果上等价于对各个子网分别求解得到的最小断点集之和。因此,如果在计算前将大规模复杂环网分解为若干个较小规模的子网络,然后对各个子网络分别求解断点集,对基于图论的算法来说,将大大降低形成所有有向基本回路和确定最小断点集两个关键步骤的计算量,提高最优配合问题的计算效率;对基于保护配合依赖关系的算法而言,将有效降低出现优先级相同断点的概率,使计算得到简化。

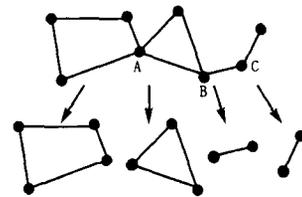


图 1 割节点与网络分解示意图

Fig 1 Cut vertex and networks decomposition

复杂环网分解的关键在于找到网络拓扑联接图中所有的割节点^[10]。所谓割节点是指:若在连通图 G 中该节点处断开网络,连通图 G 就被分解为若干个互不连通的子图。如图 1 中的节点 A、B、C 就是割节点。上述问题是一个 NP 完全问题,即解决该问题的计算量与网络规模(节点数目)成指数函数。现有算法主要有:基于盲目试探搜索的算法^[11,12]和基于某种寻优技术的算法^[13,14]。基于盲目试探搜索的算法^[11]因盲目性造成搜索的重复性,其搜索时间和存储空间都是网络规模的指数函数,在辨识大规模多环电网时存在很大局限性;某些基于盲目试探搜索的改进算法^[12]虽在一定程度上降低了计算的复杂性,但计算量仍然相当大。而基于某种寻优技术的算法,如模拟退火算法^[13]、遗传算法^[14]等,他们共同的问题在于直观性差,只能求解小规模网络且最优性难以保证,收敛速度也不理想。

本文在深入分析实际复杂电网拓扑联接特点的基础上,提出了一种对复杂环网进行割节点辨识与网络分解的新算法。该算法利用改进的广度优先搜索技术,通过搜索简化后的节点邻接矩阵能快速找到割节点,同时将复杂环网分解为若干子网,利用分解后的子网求解最小断点集,可以大大简化问题的复杂性。

1 算法原理

1.1 节点邻接矩阵^[10]

设 G 是一个 n 节点无自环连通图, 则 G 的节点邻接矩阵 (adjacent matrix) $A(G) = (a_{ij})$ 是一个 n 阶方阵, 其中 a_{ij} 等于连接第 i 个节点与第 j 个节点之间的支路数, $A(G)$ 的所有对角线元素 a_{ii} 取固定值 0。对含有 T 接线的电力网络, 本算法将 T 节点也视作独立节点参与构造节点邻接矩阵。节点邻接矩阵能方便直观地反映 G 中节点的拓扑连接关系, 为寻找割节点提供了方便。

1.2 算法基本思想

引言中已经提到, 网络分割就是寻找网络拓扑结构中所有的割节点并断开割节点的过程。现代大规模电网中含有一定数量的终端线, 由于终端线上除终端节点外的所有节点都是割节点, 所以在运用某种搜索算法对环网进行搜索前, 可预先搜索并消去终端线, 压缩后续搜索的深度。

对简化后不含终端线的网络, 本算法采用以下原理辨识割节点:

按节点编号逐个消去网络中的节点及与该节点直接相连的支路, 若消去的某个节点是割节点, 按割节点的定义, 剩下的网络不连通, 就必然存在从剩余网络中某个节点出发, 依据拓扑联接关系无法搜索到的节点, 所以通过将剩余网络中从某节点出发能搜索到的节点数与剩余网络节点总数比较, 可判断消去的节点是否是割节点。得到割节点后, 断开割节点, 复杂环网就可分解为若干个子网络。

2 算法流程

1) 根据电网拓扑联接关系, 以母线为节点, 连接各母线的线路为支路, 形成网络拓扑图, 并给图中的所有节点统一编号。T 节点按独立节点处理并参加编号, 双回/多回线用单一支路代替。

2) 形成网络节点邻接矩阵 A 。

3) 去掉终端线。可按以下步骤处理:

搜索网络节点邻接矩阵中 degree (行和) 为 1 的节点, 此为终端节点, 将终端节点归入终端节点数组 $Terminal$ 。然后根据节点邻接矩阵表示的拓扑连接关系, 从任意一个终端节点开始搜索, 直到搜索到节点 degree 大于 2 的节点为止, 则已经搜索过的 degree 为 2 的节点均为割节点, 将它们归入割节点数组 $CuVertex$ 。从网络拓扑图中去掉该条终端线, 并对节点邻接矩阵 A 作相应修改, 去掉割节点对应的行

和列。

转向下一个 degree 为 1 的节点, 重复步骤 3 的处理过程, 直到网络拓扑图中不存在 degree 为 1 的节点为止。至此, 终端线消去完毕。

4) 对消去终端线后的网络拓扑图, 记剩余节点总数为 Sum , 搜索割节点的步骤如下:

给每个节点设置已搜索状态标志位 CF 。初始化 $CF = 0$, 若某节点已经被搜索过, 置其 $CF = 1$ 。

定义数组 $Searched$ 为已经搜索到的节点集合; $Searched$ 中元素个数为 m 。

按节点序号选择一个需要判断的节点 (假定为 X), 将该节点从网络拓扑图中消去, 消去过程如图 2 所示。

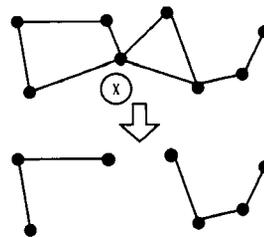


图 2 消去 X 节点示意图

Fig 2 Sketch map of removing node X

并修改节点邻接矩阵 A , 即去掉 A 中节点 X 对应的行和列。

由于节点 degree 越大, 依拓扑联接关系在该节点的下一层搜索到的节点就越多, 在节点总数不变的情况下, 搜索完所有节点所需的层数 (深度) 最少, 所以, 为了压缩搜索深度, 选择修改后节点邻接矩阵中 degree 最大的节点 (假定为 P) 置于第 1 层 (顶层), 同时把 P 归入 $Searched$ 数组, 置 P 的 $CF = 1$, $m = 1$; 搜索 P 节点对应的行, 把与 P 直接相连的节点 (假定有 i 个) 置于第 2 层, 把这 i 个节点的编号归入 $Searched$ 数组, 置它们的 $CF = 1$, $m = 1 + i$; 然后对第 2 层节点展开广度优先搜索, 把与第 2 层各节点直接相连的节点置于第 3 层, 依此类推。

搜索终止条件: 当某条链路搜索到 $Searched$ 数组中已经包含的节点 (即 $CF = 1$) 时, 该链路搜索终止; 当搜索进行到某一层, 该层中的全部节点均为 $Searched$ 数组中已经包含的节点时, 整个搜索终止。

判断割节点: 整个搜索终止后, 若 $m = Sum - 1$, 说明去掉节点 X 后, 从剩余网络中某个节点出发, 根据拓扑联接关系能搜索到全部节点, X 不是割节点; 反之, 若 $m < Sum - 1$, 说明存在根据拓扑联接关系无法搜索到的节点, 则可判断 X 为割节点。

若 x 不是割节点,依节点序号判断网络中下一个节点;若 x 是割节点,将 x 归入 $CuVertex$ 数组,并从 x 节点处断开网络,在形成的各个子网络中按前述步骤继续寻找割节点。

5)当网络中的全部节点判断完毕后,所有割节点就包含在数组 $CuVertex$ 中,大规模复杂环网就分解为若干个较小规模的子网络。

3 算例分析

图 3 是一个具有 T 接线、辐射线路、终端线、双回线以及多个环网的 13 节点典型网络。现以该图为算例,说明前述复杂环网割节点辨识与网络分解新算法。

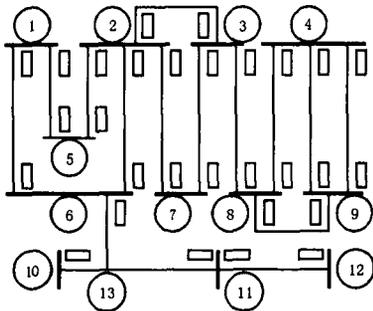


图 3 具有典型线路的电力网络示例图
Fig 3 Power networks with typical lines

1) 根据该电网拓扑联接关系,形成的网络拓扑如图 4 所示。T 接线按独立节点处理并参加编号(节点 13),节点 10 和节点 12 之间的双回线用单一支路代替。

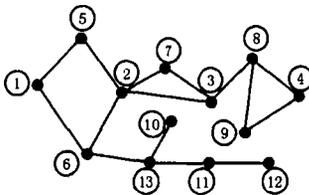


图 4 网络拓扑联接图
Fig 4 Topology graph of the power networks

2) 形成网络节点邻接矩阵 A 。

3) 搜索节点邻接矩阵 A 中度数(行和)为 1 的节点,分别是节点 10, 12, 将它们归入终端点集合数组 $Terminal$ 。搜索节点 10 对应行(第 10 行)中的非 0 元素,第 13 列元素不为 0,跳到第 13 行,因第 13 行行和大于 2,搜索终止。消去此条终端线,即去掉节点 10 对应的行和列。转向 $Terminal$ 中下一个终端节点 12,搜索第 12 行中的非 0 元素,第 11 列元素不为 0,跳到第 11 行,第 11 行行和为 2,节点 11 为割节

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

点,将其归入割节点数组, $CuVertex = \{11\}$;跳到第 13 行,第 13 行行和为 2,节点 13 为割节点,将其归入割节点数组, $CuVertex = \{11, 13\}$;跳到第 6 行,因第 6 行行和大于 2,搜索终止。消去此条终端线,即去掉节点 10, 12, 13 对应的行和列。至此,所有终端线消去完毕,网络剩余节点总数 $Sum = 9$ 。修改后的节点邻接矩阵记为 A^* :

$$A^* = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

4) 基于修改后的节点邻接矩阵 A^* ,搜索其余割节点:

a 按节点序号选择第一个需要判断的节点 1,将其从网络中消去,即去掉第 1 行和第 1 列,修改后记为 $A^*(1)$ 。选择 $A^*(1)$ 中度数最大的节点(节点 2)按前述步骤展开第 1 轮搜索,搜索过程如图 5(a)所示(判断搜索终止的节点以下划线表示)。

第 1 轮搜索结束后,数组 $Searched = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8\}$, $m = 8$;因 $m = Sum - 1$,判断节点 9 为非割节点。

将数组 $Searched$ 清空,同时将 m 置零。

b 按节点序号选择下一个节点 10,将其从网络中消去,修改 A^* 为 $A^*(1, 10)$ 。选择 $A^*(1, 10)$ 中度数最大的节点(节点 11)展开第 2 轮搜索,搜索过程如

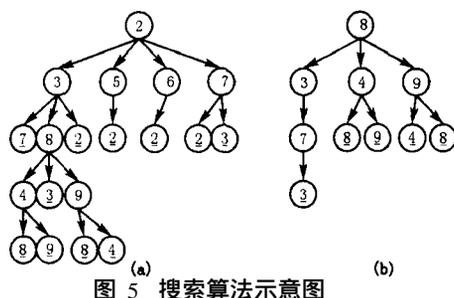


图 5 搜索算法示意图

Fig 5 Sketch map of searching algorithm

图 5(b)所示。

第 2 轮搜索结束后, $Searched = \{ \quad \}$, $m = 5$; 因 $m < Sum - 1$, 判定节点 为割节点。把节点 归入割节点数组 $CuVertex$, 此时 $CuVertex = \{ \textcircled{11}, \textcircled{13}, \quad \}$ 。

将数组 $Searched$ 清空, 同时将 m 置零。

c 从节点 处断开网络, 在形成的各个子网络中按前述步骤继续寻找割节点。

5) 当网络中的全部节点都判断完毕后, 所有割节点就包含在数组 $CuVertex$ 中, 此时, $CuVertex = \{ \textcircled{11}, \textcircled{13}, \quad , \quad , \quad \}$ 。网络分割结果如图 6 所示。

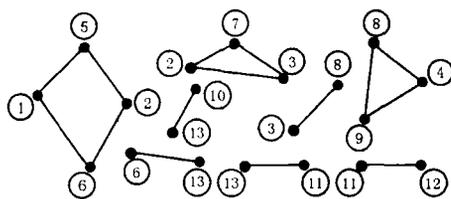


图 6 结果示意图

Fig 6 Sketch map of conclusion

4 结论

本文在深入分析实际复杂电网拓扑联接特点的基础上, 提出了一种对复杂环网进行割节点辨识与网络分解的新算法。该算法利用改进的广度优先搜索技术, 通过搜索简化后的节点邻接矩阵能快速找到所有割节点, 同时将复杂环网分解为若干小的子网, 大大简化了求解最小断点集的复杂性。本文给出的详细算例证明了该算法的实用性和有效性。

参考文献:

- [1] Dwarakanath M H, Nowitz L. An Application of Linear Graph Theory for Coordination of Directional Over-current Relays[A]. Electric Power Problems the Mathematical Challenge, SAM. Philadelphia: 1980. 104-114.
- [2] 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.

- [3] Madani S M, Rijanto H. A New Application of Graph Theory for Coordination of Protective Relays[J]. IEEE Power Engineering Review, 1998: 43-45.
- [4] 吕飞鹏, 李兴源, 李华强, 等. 多环复杂电网方向保护全网最优配合的研究: 确定所有有向基本回路矩阵[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(8): 33-37.
- L üFei-peng, LI Xing-yuan, LI Hua-qiang, et al Studies on the Optimal Coordination of Directional Protective Relays in Multi-loop Complex Power Networks, Part I Determination of Complete Directed Basic Loops [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(8): 33-37.
- [5] 吕飞鹏, 李兴源, 李华强, 等. 多环复杂电网方向保护全网最优配合的研究: 确定全网最优配合顺序[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(9): 55-56.
- L üFei-peng, LI Xing-yuan, LI Hua-qiang, et al Studies on the Optimal Coordination of Directional Protective Relays in Multi-loop Complex Power Networks Part II Determination of the Optimal Coordination Sequence [J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(9): 55-56.
- [6] Jenkins L, et al An Application of Functional Dependencies to the Topological Analysis of Protection Systems [J]. IEEE-PWRD, 1992, 7(1): 77-83.
- [7] 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).
- L üFei-peng 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).
- [8] 丘昌涛, 王金利, 聂宏展. 大规模电力系统不对称短路的分块射影解法[J]. 电网技术, 1995, 12(19): 1-5.
- QU Chang-tao, WANG Jin-li, NIE Hong-zhan Projective Piecewise Solution of Unsymmetrical Short Circuit in Large Power System [J]. Power System Technology, 1995, 12(19): 1-5.
- [9] Ramaswami R, Damborg M J, Venkata S S Coordination of Directional Over-current Relays in Transmission Systems—a Subsystem Approach [J]. IEEE-PWRD, 1990, (5)1: 64-71.
- [10] 殷剑宏, 吴开亚. 图论及其算法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- YN Jian-hong, WU Kai-ya Graphics Theory and Its Al-

- gorithm [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003.
- [11] Rajcic D. A Method for Determination Whether a Network is Connected for Split [J]. IEEE Power Engineering Review, 2001, 7: 65-66
- YN Jian-hong, WU Kai-ya. Graphs Theory and Its Algorithm [M]. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 2003.
- [12] 毕天姝, 焦连伟, 严正, 等. 用于分布式故障诊断系统的新型网络分割法 [J]. 电力系统自动化, 2001, 8(1): 16-21.
- BI Tian-shu, JIAO Lian-wei, YAN Zhen, et al. Graph Partitioning Method for Distributed Fault Selection Estimation System in Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 8(1): 16-21.
- [13] Donnett J G, Starkey M, Skillicom D B. Effective Algorithms for Partitioning Distributed Programs [J]. Conference Proceedings of Seventh Annual International Phoenix Conference on Computer and Communications USA: 1988 363-368.
- [14] Qian F, Hirata H. A Parallel Learning Cellular Automata for Combinatorial Optimization Problems [J]. Proceedings of IEEE International Conference on Evolutionary Computation Nagoya (Japan): 1996 553-558

收稿日期: 2006-05-15

作者简介:

陈绩 (1979-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统继电保护研究; E-mail: chenji929@tom.com

吕飞鹏 (1968-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统继电保护和故障信息处理智能系统研究;

黄姝雅 (1982-), 女, 硕士研究生, 从事电力系统稳定运行及调度研究。

A novel algorithm for network partition of relay coordination in a complicated multi-loop power networks

CHEN Ji, Lü Fei-peng, HUANG Shu-ya
(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to decrease the complexity of determining the minimum break point set in a large scale complicated multi-loop power networks, the whole network can be partitioned into several sub-networks in advance. Based on the simplified nodal adjacency matrix analysis and enhanced breadth first search technology, a novel algorithm is presented in this paper to identify cut vertices for network decomposition. The proposed algorithm is validated by a detailed example analysis.

Key words: power system; coordination and setting of relaying protection; minimum break point set; cut vertex; network partition; node adjacency matrix

(上接第 5 页 continued from page 5)

Study on the large transformer protection principle based on the winding parameter identification

CHU Yun-long¹, HAO Zhi-guo², LI Peng²
(1. Northwest China Grid Company, Xi'an 710048, China; 2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: A transformer protection algorithm based on the winding parameter identification is described in this paper. First of all, the algorithm calculates the each side winding flux in equation which uses the transformer data (currents and voltage) and the transformer parameter including resistance and leakage inductance at each transformer terminal. In normal operation state, the magnetic flux is equal between the primary and secondary winding. But it is not equal in internal fault state, for the transformer structure and parameter has been changed. Then, the algorithms can discriminate fault status from failure free operation by estimating whether the flux of the primary and secondary winding is equal or not. The results indicate that the proposed algorithms can successfully detect the different styles internal fault, and can sensitively find the fault in a fraction of a cycle. The algorithm also remains stable during magnetizing inrush and over-excitation, and is not affected by changing the core characteristics.

The project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50577050).

Key words: transformer; differential protection; inrush; parameter identification; circuit equation