

基于节点融合分层法的电网并行拓扑分析^①

王惠中^{1,2}, 赵燕魏^{1,2}, 詹克非¹, 朱宏毅³

¹(兰州理工大学 电气工程与信息工程学院, 兰州 730050)

²(甘肃省工业过程先进控制实验室, 兰州 730050)

³(国网甘肃省电力公司电力科学研究院, 兰州 730050)

摘要: 随着现代多核和集群技术的快速发展, 并行计算设计成为提高计算效率的主流技术之一. 对此, 提出了一种基于节点融合和分层的并行网络拓扑分析新方法. 在电力网络正常运行时, 首先利用节点的邻接表进行并行融合, 对电网进行静态电气岛拓扑分析, 并完成电气岛邻接表的分层; 当网络拓扑发生变化后, 根据节点所在回路链表的属性及并行深度优先搜索法更新局部网络拓扑和电气岛邻接表. 最后, 通过 MATLAB 并行计算工具箱(Parallel Computing Toolbox)对实际电网进行拓扑分析, 计算结果验证了本方法的正确性和快速性.

关键词: 并行拓扑分析; 节点融合; 邻接表; 回路链表

Grid Parallel Topology Analysis Based on Method of Node Integration and Layering

WANG Hui-Zhong^{1,2}, ZHAO Yan-Yei^{1,2}, ZHAN Ke-Fei¹, ZHU Hong-Yi³

¹(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

²(Key Laboratory of Gansu Advanced Control for Industrial Processes, Lanzhou 730050, China)

³(Gansu Electric Power Research Institute, SGCC, Lanzhou 730050, China)

Abstract: With the rapid development of modern multi-core and cluster technology, design of parallel computing to improve the efficiency has become one of the mainstream technologies. This paper puts forward a new method of node-based integration and hierarchical network topology in parallel. When in the normal operation of power network, using parallel fusion nodes adjacent table, to analyze static electric Island grid topology, electrical island adjacent to form and hierarchy. When the network topology changes, according to the attributes of the nodes and parallel depth first search method, it updates the local network topology and the electrical Island adjacency list. a practical network being analyzed by MATLAB's Parallel Computing Toolbox and the results prove the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: parallel topology analysis; node integration; adjacency list; linked list of loop

1 引言

电力系统网络拓扑分析是根据收到的电网开关变位信息, 采用合理的算法确定元件的连接关系, 进而把电力系统的实际网络结构转化为精确的数学模型. 它是电力系统仿真和分析计算的基础, 可为状态估计、潮流计算、故障分析、整定计算等提供网络拓扑及参数信息^[1].

常用的电网拓扑分析算法主要有矩阵法^[2-5]、搜索法^[6-8]、节点连通岛合并法等. 矩阵法主要是在邻接矩

阵的基础上通过不同的计算方式获取表征系统全局连通性矩阵, 其方法的运算复杂度为 $O(n^3)$, 此外图中任意支路状态发生变化时, 该算法的通用性差^[9,10]. 树搜索法主要是基于深度优先搜索法和广度优先搜索法及其改进变形算法, 此类算法对变电站复杂接线方式和环网适应性较差. 同时, 随着现代多核、集群及广域分布式并行计算技术的快速发展, 传统算法不能有效利用现行并行计算平台(如云计算平台), 这也大大制约了电网拓扑效率的提高.

① 基金项目:甘肃省自然科学基金(1308RJZA117)

收稿时间:2015-12-22;收到修改稿时间:2016-03-08 [doi:10.15888/j.cnki.csa.005367]

为此本文在满足电网拓扑分析的通用性和快速性的基础上,从并行计算的角度出发提出了基于节点融合分层的电网并行拓扑分析.

2 电网静态拓扑分析

2.1 邻接表

邻接表是图的一种最主要存储结构.在图论中,邻接表描述图中每个点的所有边或弧.

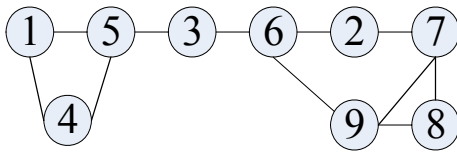


图 1 9 节点系统

根据图 1 所示系统,其邻接表如图 2 所示.图中顶点为系统的各个节点,邻接点为与顶点相连接的节点.

4	→	1	→	5	∧		
1	→	4	→	5	∧		
5	→	1	→	3	→	4	∧
3	→	5	→	6	∧		
6	→	2	→	3	→	9	∧
2	→	6	→	7	∧		
9	→	6	→	7	→	8	∧
7	→	2	→	9	→	8	∧
8	→	9	→	7	∧		

图 2 9 节点系统邻接表

2.2 邻接表的节点融合算法

2.2.1 算法基本原理

在一个网络拓扑图中,节点 i 和它的邻接节点 j、k 形成的连通区域称为该节点的连通岛,并用岛内所包含节点 i、j、k 中最小节点号作为该连通岛的岛号^[10],即该节点为该连通岛的根节点.

若多个电气连通岛之间存在相同的连接点,则连通岛可以看作各个节点合并融合而形成的大节点,因此可进一步进行合并融合,直到所有相连接的节点最终合并融合为一个电气岛,其连通岛号为最小节点号.

2.2.2 算法的并行执行

如图 3 所示,开始时根据边与节点关系生成邻接表.首先比较节点 i 及其邻接的每个节点号的大小,将

其中较小的节点号作为节点 i 的连通岛号,结果如图 3(a)所示,即在此图中,每个节点 i 指向邻接节点号最小的节点(根节点);接着追踪图 3(a)中的路线,直到每个节点都达到其最终目的,此时第一组电气岛由节点(1、4、5)组成,第二组电气岛由节点(2、6、7、9)组成,第三组和第八组电气岛分别由节点 3 和 8 组成.其次,如图 3(b)所示,将第三组与第一组电气岛合并,所以第一组电气岛现在由节点(1、3、4、5)组成.将第八组和第二组电气岛合并,所以第二组电气岛现在由节点(2、6、7、8、9)组成.最后,由图 3(c)所示,此时所有节点均并入第一组电气岛,这就意味着原图只有一条连通分量.

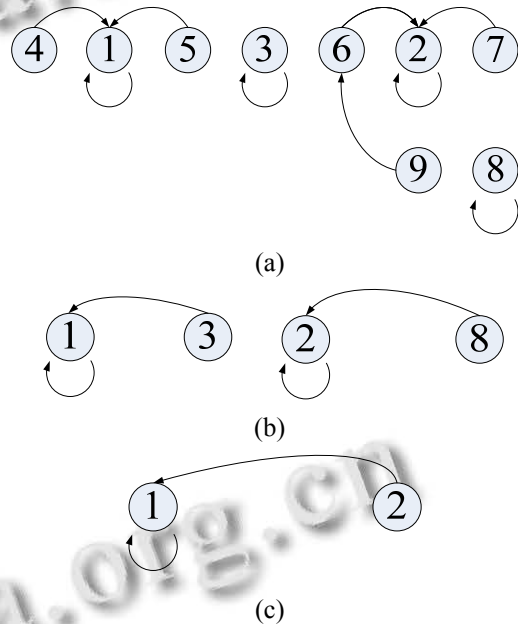
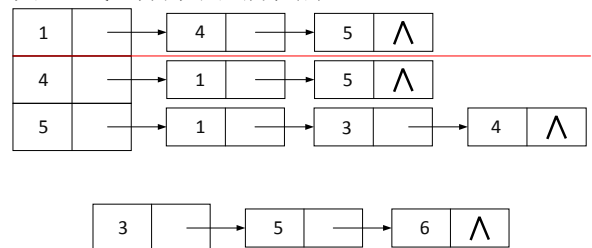


图 3 算法执行步骤

2.3 基于邻接表的节点融合及分层

在节点合并过程中,令连通岛的根节点为父层,其合并的邻接点为其子层,故节点合并分层过程如图 4 所示,最终形成分层的电气岛邻接表如图 4(c)所示,表中以红线区分开节点所在层.



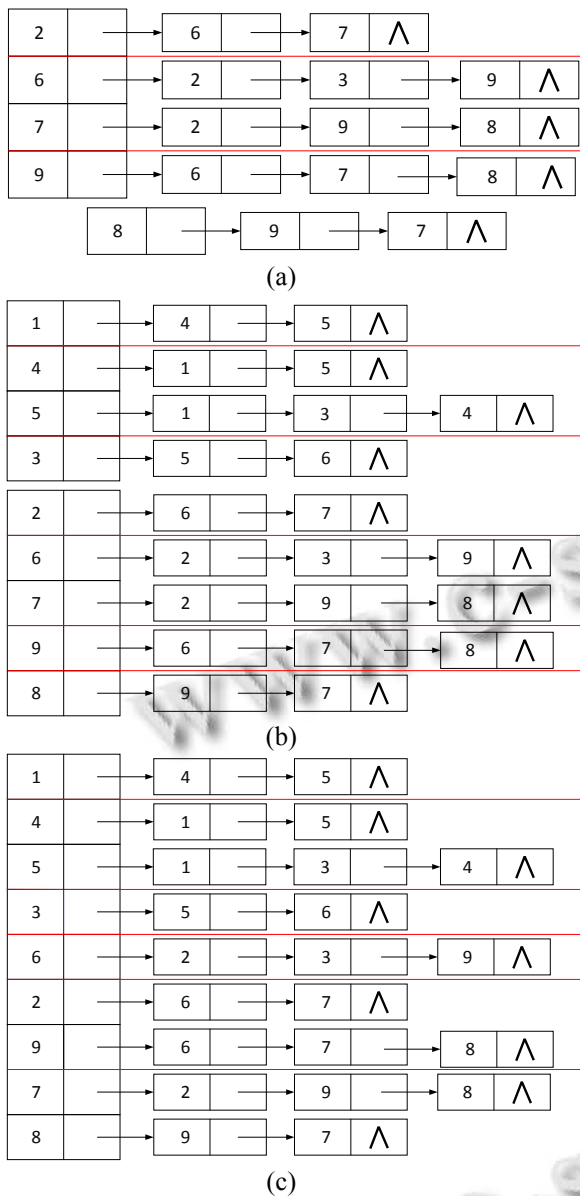


图 4 节点邻接表的融合及分层过程

通过节点的融合分层完成电网的静态拓扑分析, 实现电网拓扑连通性的判断, 并为电网的并行动态拓扑更新做好数据准备.

3 离线生成回路链表

在连通图中选定一个树后, 任意添加一条连支, 这样包含且仅包含一条连支的回路即为基本回路. 在回路中任意两点间不只存在一条路, 因此, 若断开的边位于回路当中, 则电气岛的连通性将不会发生变化.

鉴于连支在回路的以上特性, 本文定义回路链表 $Lg(g$ 表示连通岛号). 在 Lg 中, 第 1 列为基本回路中的

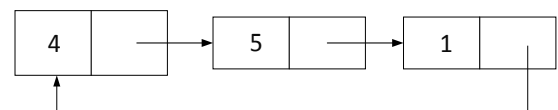
连支, 其余列为基本回路中的树支. 根据静态拓扑分析中节点融合分层生成的电气连通岛的邻接表, 可离线并行生成回路链表. 其生成步骤如下:

步骤 1: 根据分层的邻接表, 可得到同层连接两节点的支路为连支, 定义为同层连支; 子节点有两个及以上的父节点的连接支路, 其中一条支路为树支, 其他支路为连支, 定义为跨层连支. 因此除去连支, 可生成一个树, 其最终的根节点为电气岛的连通岛号.

根据上述定义, 由图 4(c) 所示, 节点 4 和节点 5 相连接且位于同一层, 故连支 4-5 为同层连支; 由此, 7-8 亦为同层连支. 节点 7 有两个父层节点, 分别为节点 2 和节点 9, 选其中支路 7-9 为树支, 则支路 7-2 为跨层连支.

步骤 2: 通过各个连支的两节点, 可同时并行向父层进行树支的节点融合, 形成各个连支所在的基本回路链表, 最终构成电气岛的回路链表.

通过步骤 1 中所得连支 4-5, 由节点 4 和节点 5 两节点并行向父层进行树支节点融合, 可得回路链表 4-5-1.



其他连支同时并行向父层进行树支节点融合. 本文为便于描述, 默认回路链表中末节点指向首节点. 最终由图 4(c) 可得到回路链表 $L1$ 如图 5 所示.

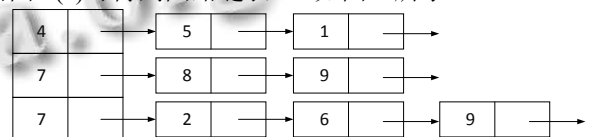


图 5 回路链表

4 网络并行拓扑更新

电力系统网络正常的停运、故障检修等因素造成的电网开关变位, 反映在电网拓扑上主要分为支路的断开和闭合两种情况. 其中支路断开可分为: 回路中连支断开、回路中树支断开、非回路中树支断开三种情况. 闭合支路又分为: 同一电气岛内两节点闭合、不同电气岛两节点闭合.

本文根据支路在以上变位情况, 可同时并行对其邻接表和回路链表进行修改, 而邻接表各个顶点又可

同时并行进行修改。

4.1 网络中支路断开

4.1.1 回路中连支断开

回路中连支断开, 电气岛连通性不受影响, 所以, 对其邻接表进行修改, 并行删除断开支路顶点的邻接点, 同时更新连支所在的回路链表, 删除其所在回路。

如图 1 所示系统, 若连支 4-5 断开, 则电气岛不变, 修改邻接图 4(c), 顶点 4 和 5 彼此对应的邻接点可同时并行删除, 结果如图 6 所示; 并从回路链图 4 中删除其所在回路, 如图 7 所示。

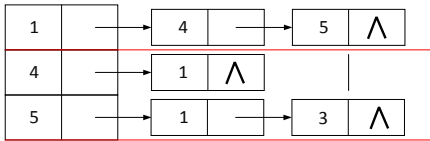


图 6 邻接表

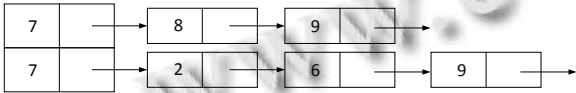


图 7 回路链表

4.1.2 回路中树支断开

回路中树支断开, 电气岛连通性不受影响, 故修改邻接表相关节点, 同时修改回路链表. 根据断开的树支所在回路状况, 回路链表的修改又可分为以下两种。

情况 1: 基本回路中树支断开, 则直接把该回路中连支变为树支, 并将该回路从回路链表中删除. 如图 1 所示系统, 树支 1-5 断开, 可得邻接表图 8 和回路链表如图 9。

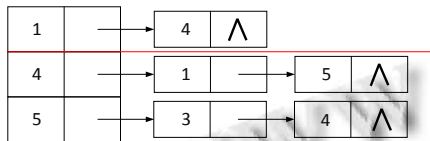


图 8 邻接表

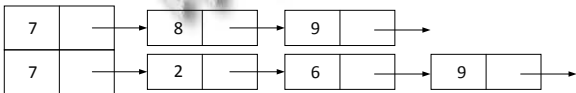


图 9 回路链表

情况 2: 断开树支在多条回路中, 则优先选取同层连支所在的回路(否则任取一条跨层连支回路), 将连支变为树支, 并将该回路与其余断开支路的回路合并, 在此基础上, 删除两条回路的公共部分, 并将该回路删除。

如图 1 所示系统, 若树支 7-9 断开, 则电气岛不变,

修改邻接图 4(c), 如图 10 所示; 并选取同层连支所在的回路 7-8-9, 把 7-8 变为树支, 再与 7-2-6-9 合并成新的回路, 得到如图 11 所示回路链表。

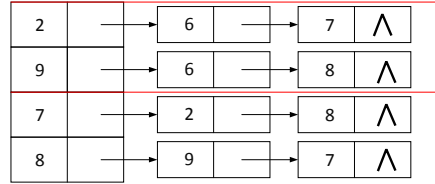


图 10 邻接表

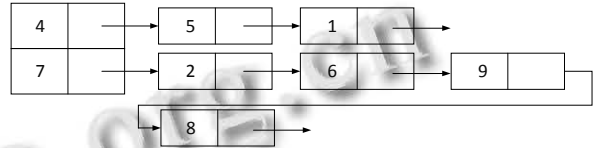


图 11 回路链表

4.1.3 非回路中树支断开

若非回路中树支断开, 则电气岛的连通性将发生变化, 最终发生分裂. 在此, 本文借助并行 BFS(并行深度优先搜索法), 由断开节点沿着树支进行搜索, 当有一新电气岛形成即结束搜索, 拓扑更新完成。

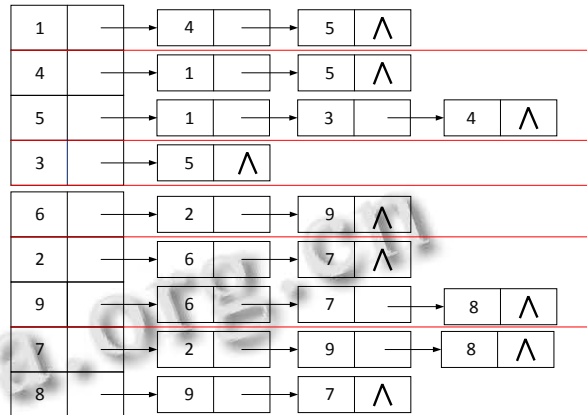


图 12 邻接表

如图 1 所示系统, 若树支 3-6 断开, 由于其不在回路中, 故电气岛发生解裂. 此时由断开节点 3 和节点 6 同时分别进行并行 BFS(广度优先搜索), 即可得新的电气岛, 如邻接表 10 所示. 拓扑更新完毕, 离线修改回路链表, 可得回路链表 L1 和 L2, 如图 13 所示。

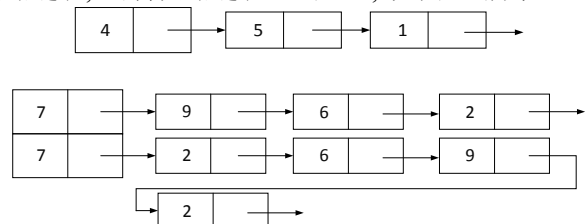


图 13 回路链表

4.2 网络中支路闭合

根据闭合支路两节点的不同位置,支路闭合可分为 2 种情况。

1)同一电气岛内两节点闭合,则电气岛连通性不受影响,闭合支路为连支,离线修改邻接表和回路链表即可。

2)不同电气岛两节点闭合,闭合支路为树支,修改、合并邻接表,并将回路链表进行合并。

4.3 算例分析

为进一步验证提出的拓扑分析算法的正确性与实时性,在四核 AMD 处理器、Windows 10 操作系统环境下,通过 MatlabR2015a 中并行计算工具箱对 IEEE300-节点系统和波兰 3375-节点系统进行测试验证^[11]。

本文算法与两种传统矩阵算法进行了比较,其运行时间如表 1 所示。

表 1 几种算法拓扑分析所需时间

算法	程序运行时间 /s	
	300 节点	3375 节点
邻接矩阵自乘法	4.336	15.129
连通矩阵平方法	2.021	5.097
本文算法	0.694	0.906

由表 1 可以看出,邻接矩阵自乘法运算量最大,耗时较长;连通矩阵平方法减少了矩阵自乘次数,时间大幅缩短;本文算法则比上述两种算法计算速度明显要快。

当拓扑结构发生变化时,本文算法拓扑更新与传统矩阵算法时间比较,运行时间如表 2 所示。

表 2 拓扑更新时几种算法拓扑分析所需时间

算法	程序运行时间 /s	
	300 节点	3375 节点
邻接矩阵自乘法	4.981	15.146
连通矩阵平方法	2.627	5.101
本文算法	0.024	0.039

由表 13 可见,拓扑结构发生变化时,传统算法需要重新计算,耗时变化不大;而本文算法只局部并行更新,其耗时明显减少。

最后,通过上述两个表可以表明,随着电力网络系统节点的增多,本文算法与传统算法相比效率优势

更加明显。

5 结论

1)本文从并行计算的角度,提出一种基于节点融合和分层的并行网络拓扑分析新方法。正常情况下,对邻接表的各节点进行并行融合,并完成电气岛邻接表的分层实现电网静态拓扑分析;然后离线生成电气岛网络拓扑的树,并根据连支生成回路链表。当网络拓扑发生变化后,根据节点所在回路链表,更新局部网络拓扑及电气岛邻接表,当断开树支不在任何回路时,利用并行广度优先搜索法进行搜索,完成拓扑更新。

2)针对 IEEE300-节点和波兰 3375-节点系统电网进行拓扑分析,与传统算法相比,计算结果验证了该方法的正确性和快速性。

参考文献

- 张伯明,陈寿孙,严正,等.高等电力网络分析.北京:清华大学出版社,2007.
- 王湘中,黎晓兰.基于关联矩阵的电网拓扑辨识.电网技术,2001,25(2):10-12,16.
- 黄正,陈凡,张雪娇,王寒娜,刘思明.电网拓扑分析算法的研究.南京工程学院学报(自然科学版),2013,11(2):43-49.
- 姚玉斌,叶爽利,吴志良,王丹.稀疏矩阵法网络拓扑分析.电力系统保护与控制,2011,39(23):1-5,10.
- 姚玉斌,宣俭,于娜,王丹,吴志良.连通矩阵准平方法网络拓扑分析.电力系统保护与控制,2011,39(5):31-34.
- Bose A, Clements K. Real-time modeling of power networks. Proc. of the IEEE, 1987, 75(12): 1607-1622.
- 宋少群,朱永利,于红.基于图论与人工智能搜索技术的电网拓扑跟踪方法.电网技术,2005,29(19):45-49.
- 梅念,石东源,段献忠.基于图论的电网拓扑快速形成与局部修正新方法.电网技术,2008,32(13):35-39.
- 马静,张俊好,马伟,王增平.基于关联矩阵标记法与回路矩阵的电网拓扑分析.电力系统自动化,2014,38(12):74-80.
- 张焯,周苏荃.基于节点连通岛合并法网络动态拓扑分析.电力系统保护与控制,2013,41(5):72-76.
- Zimmerman R, Murillo-Sanchez C, Gan DQ. MATPOWER: A MATLAB power system simulation package. Ithaca, NY: Power Systems Engineering Research Center at Cornell University, 2010. <http://www.pserc.cornell.edu/matpower/>. [2014-12-17].