

DOI: 10.7667/PSPC160502

基于聚类算法的关键输电断面快速搜索

何培颖, 房鑫炎

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 关键输电断面的快速搜索对电网的保护与控制具有重要意义。提出一种基于聚类算法的关键输电断面快速搜索算法。综合考虑线路介数和支路潮流, 作为线路权重指标, 运用 Dijkstra 算法计算两点间最短距离, 构建相似度矩阵。通过 AP(affinity propagation)算法得到电网分区。在分区的基础上, 运用图论中基本割集搜索理论, 结合所提生成树约束条件, 完成输电断面的快速搜索。最后利用断面安全裕度对输电断面的重要性排序。通过新英格兰 39 节点系统为例进行仿真计算, 验证了所提方法的有效性。

关键词: 线路介数; 相似度矩阵; 基本割集; 输电断面; 安全裕度

Fast search of the key transmission sections based on clustering algorithms

HE Peiying, FANG Xinyan

(School of Electronic Information and Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: Fast search of the key transmission sections plays an important role in the protection and control of power system. A fast search method of the key transmission sections based on clustering algorithms is proposed. The weight of lines is given considering both line betweenness and power flow. The similarity matrix can be obtained based on the shortest distance of two buses which is got through Dijkstra algorithms. Then Affinity Propagation (AP) algorithm is used to construct the partition of power grid. Based on the partition, combined with the constraints of spanning tree proposed, fast search of the transmission sections can be completed through the basic cut-sets searching theory. Finally, key sections can be sorted according to the safety margin of the section. The analysis results of New England 39-bus standard system verify the validity of the method.

Key words: line betweenness; similarity matrix; basic cut-sets; transmission section; safety margin

0 引言

随着高电压、大电网的建设, 电网结构趋于复杂^[1], 电力系统的安全稳定控制变得更加困难。大停电事故的发展过程通常表现为: 运行在接近极限边缘的电力网络因若干低概率事故(如检修期间发生局部故障等), 引发潮流大范围转移, 造成相邻元件过载, 形成连锁过载跳闸而导致系统大面积停电^[2-3]。

实际上, 支路切除引起全网潮流的重新分布是不同的, 绝大部分潮流是在与切除支路并行且电气距离较近的支路转移的, 即电网潮流只在与切除支路所在的输电断面内转移。

因此, 快速有效地识别输电断面, 对防止电力系统大停电事故的发生具有重要意义^[4-6]。实际电网运行中, 输电断面一般依靠运行人员的经验来确定, 难以适应运行方式多变的实时电网^[7]。

文献[8-9]采用最短路径算法搜索与故障支路形成回路的前 K 最短路径, 能完整地搜索到与故障支路潮流转移因子较大的支路, 但其是以预设的故障支路为基础, 对运行多变的实时电网适应性较差。文献[10-11]基于地理分区, 结合图论知识, 搜索初始断面, 运用安全裕度指标辨识关键断面, 但地理分区的划分依赖于专家经验。文献[12]同样依赖于专家经验, 将整个网络按厂站和供电区域简化, 同时考虑了电磁环网对断面搜索的影响。文献[13-14]利用网络图论知识, 对电网进行简化和分区, 在分区基础上搜索输电断面, 但存在区内关键支路遗漏的问题。

本文提出综合考虑线路介数和支路潮流的线路权重选取方法, 反映线路的脆弱性程度, 基于 AP 算法对电网分区, 结合图论中基本割集的搜索理论, 考虑本文提出的生成树形成约束, 快速搜索输电断

面, 通过安全裕度指标对断面的重要度排序, 得到电网的关键输电断面。

1 基于 AP 算法的系统分区

1.1 输电断面特征

输电断面一般是指系统不同分区间的输电走廊, 输电断面具有以下特征:

- 1) 输电断面是电网的割集;
- 2) 组成输电断面的各条线路有功潮流方向一致;
- 3) 输电断面体现了电网的脆弱环节, 断开输电断面将对两端区域的功率传输产生重要影响, 威胁整个电网的安全稳定运行。这种脆弱环节既包含网络拓扑结构本身所具有的连接脆弱性, 也包含由潮流分布决定的脆弱性。

输电断面的判别本质上属于网络拓扑结构的辨识问题, 因此可以利用图论知识快速搜索得到。大量的研究表明, 规模巨大、结构复杂的电力网络具有小世界网络特性。因此可采用复杂网络理论中相关成果进行输电断面的搜索。

本文搜索输电断面的思路是: 运用 AP 算法进行系统分区, 得到满足特征 3 的系统分区和分区联络线。在系统分区和分区联络线基础上, 考虑潮流方向约束, 结合图论中基本割集搜索理论, 快速搜索断面, 即可得到满足 1、2 特征的输电断面, 最后根据安全裕度指标对关键输电断面进行排序和辨识。

1.2 AP 算法原理

根据复杂网络理论的最新研究成果, AP 算法 (Affinity Propagation) 是一种时间复杂度低, 不需要人工选择聚类中心的聚类算法。目前 AP 算法作为一种分区算法, 已应用到数据库分析, 基站选址等领域。对于大电网电力系统的输电断面搜索, 由于其节点数众多、无法预知分区数、对实时性要求高的特点, 采用 AP 算法可以很好地解决该问题。

AP 聚类算法以节点间的相似度 $S(i, k)$ 为基础, $S(i, k)$ 表示节点 x_k 是节点 x_i 聚类中心的可能性。在节点间传递两种消息, 分别为责任度 (responsibility) $r(i, k)$, 表示与其他节点相比, x_k 作为 x_i 聚类中心的程度; 合适度 (availability) $a(i, k)$, 表示根据 x_k 作为 x_i 聚类中心的合适程度。

在算法开始, 所有合适度被赋值为 0。然后根据以下规则计算责任度:

$$r(i, j) = s(i, j) - \max_{j' \neq j} [a(i, j') + s(i, j')] \quad (1)$$

合适度通过以下规则计算:

$$a(i, j) = \begin{cases} \min_{i' \neq j} \{0, r(j, i') + \sum_{i'' \neq i, j' \neq j} \max[0, r(i'', j)]\} \\ \sum_{i=j} \max[0, r(i', j)] \end{cases} \quad (2)$$

一般以迭代过程中责任度 R 矩阵和合适度 A 矩阵基本不变, 作为 AP 算法结束的判据。

1.3 构建相似度矩阵

运用 AP 算法进行电网分区的首要工作是构建电网的相似度矩阵, 为使分区结束后得到的分区联络线满足特征 3, 提出一种综合考虑线路介数和支路潮流的线路权重选取方法, 该权重指标能反映线路在电网中的脆弱程度。然后运用 Dijkstra 算法计算节点间最短距离, 构造相似度矩阵。

拓朴理论中, 对线路介数的定义为: 网络中任意两节点间最短路径通过该支路的次数。实际应用中, 常将该值与网络中任意两节点间最短路径总数的比值作为线路介数, 即

$$G_k = \frac{\sum_{i \neq j \in V} N_{ij}(k)}{\sum_{i \neq j \in V} N_{ij}} \quad (3)$$

线路介数越大表明该支路在网络中处于越核心的位置, 但该指数没有考虑电网的潮流, 不能反映其对电网的综合影响。如图 1 中支路 $l_{5,6}$ 的潮流为 5, 其余支路潮流为 1, 可以计算得支路 $l_{4,5}$ 介数最大为 0.53, 支路 $l_{5,6}$ 介数为 0.47, 显然支路 $l_{5,6}$ 更能体现电网的脆弱环节, 断开该支路对系统稳定影响更大。

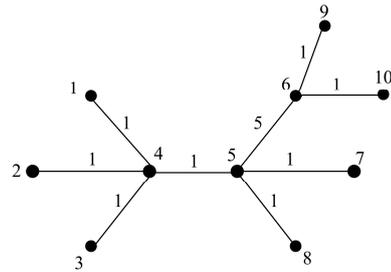


图 1 10 节点示意图

Fig. 1 Illustration of 10-bus network

因此定义输电介数为

$$W_k = G_k \times \frac{P_k}{P_{\max}} \quad (4)$$

式中: W_k 为支路 k 的输电介数; G_k 为支路 k 的线路介数; P_k 为支路 k 的潮流; P_{\max} 为网络中最大潮流支路潮流。

相似度矩阵 S 的构造方法为

$$S(i, j) = \begin{cases} d_{ij}, i \neq j \\ 0, i = j \end{cases} \quad (5)$$

式中, d_{ij} 为通过 Dijkstra 算法, 以输电介数为线路权重的节点 i 和节点 j 间的最短距离。

电网分区算法流程如图 2 所示。

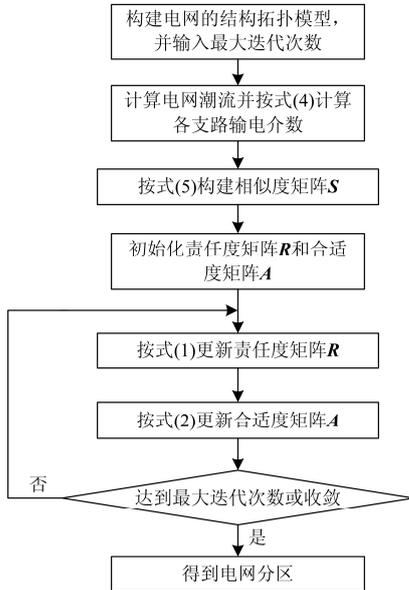


图 2 电网分区流程图

Fig. 2 Process of network partitioning

2 基于电网分区的关键输电断面搜索

2.1 输电断面搜索

由输电断面的特征可知, 输电断面搜索应是对电网分区后的分区图, 基于潮流方向一致性约束的割集的搜索。由于电网分区后的分区图是一个简单、低维的图, 可运用图论中基本割集搜索的方法快速获取。

图 3(a)为某系统分区后的分区图, 下面以图 3 为例说明分区间基本割集的搜索步骤。

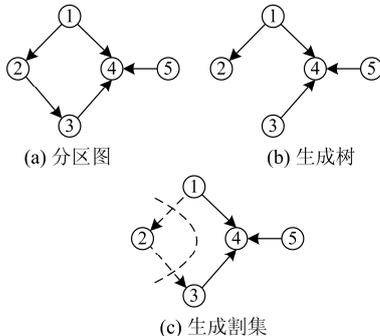


图 3 基本割集搜索过程

Fig. 3 Process of searching for basic cut-sets

图 3(a)中, 分区 1 和分区 2 之间的联络线 l_{1-2} 所属基本割集的搜索过程为

1) 移去所有连枝, 余下一棵树, 如图 3(b)。

2) 移去联络线 l_{1-2} , 树被分成两个孤立部分 $\{2\}$ 和 $\{1, 3, 4, 5\}$ 。

3) 则支路 l_{1-2} 和连接 $\{2\}$ 、 $\{1, 3, 4, 5\}$ 的连枝 l_{2-3} 构成基本割集。

上述搜索得到的割集不一定形成电网的输电断面, 因为上述得到的割集并没有考虑潮流方向, 而输电断面还必须满足潮流方向一致性的约束。如图 3(c)得到的基本割集 $\{l_{1-2}, l_{2-3}\}$, 支路 l_{1-2} 与支路 l_{2-3} 潮流方向不一致, 所以该割集不构成输电断面。

为保证步骤 3) 搜索得到的割集中线路潮流的一致性, 在生成生成树时, 需满足如下两条约束:

约束 1: 优先移除与待搜索联络线相邻且潮流方向一致的线路;

约束 2: 保留与待搜索联络线相邻且潮流方向相反的线路。

如图 4, 搜索联络线 l_{1-2} 所属输电断面, 构建生成树时, 移除与其相邻且潮流方向一致的线路 l_{1-4} , 保留与其相邻且潮流方向相反的线路 l_{2-3} , 得到生成树, 如图 4(a)。根据步骤 2)、3), 即可得到割集 $\{l_{1-2}, l_{1-4}\}$, 此时, 线路 l_{1-2} 、 l_{1-4} 潮流方向相同, 因此该割集就是系统的输电断面。

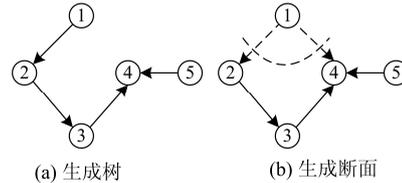


图 4 输电断面搜索过程

Fig. 4 Process of searching for transmission sections

按上述步骤搜索每条联络线所在输电断面, 即可得到该系统所有的输电断面。图 3(a)系统的输电断面搜索结果如表 1。

表 1 断面搜索结果

Table 1 Transmission sections of the system

序号	断面
1	l_{1-2}, l_{1-4}
2	l_{1-4}, l_{3-4}
3	l_{1-4}, l_{2-3}
4	l_{4-5}

2.2 关键输电断面的排序

对于大型互联电网, 断面的功率输送能力对于电网的安全稳定有着重大的影响。电网安全裕度是输电断面关键性评价的重要指标

电网安全裕度的计算公式为

$$M_i = 1 - \frac{P_i}{P_i^{\max}} \quad (6)$$

式中： P_i 为断面传输功率； P_i^{\max} 为断面的极限传输功率； M_i 越小，表示该断面安全裕度越低，其对电网的安全稳定影响越大，所以断面重要度越高。

3 算例仿真

本文以新英格兰 39 节点系统为例，验证本文关键断面搜索算法的有效性和可行性。新英格兰 39 节点系统包括 10 个发电机节点，29 个负荷节点，46 条支路。

3.1 系统分区

运用 MATPOWER 程序计算一遍系统潮流，根据本文算法构建系统的相似度矩阵，调用 AP 算法获得新英格兰 39 节点系统分区，如图 5 所示。

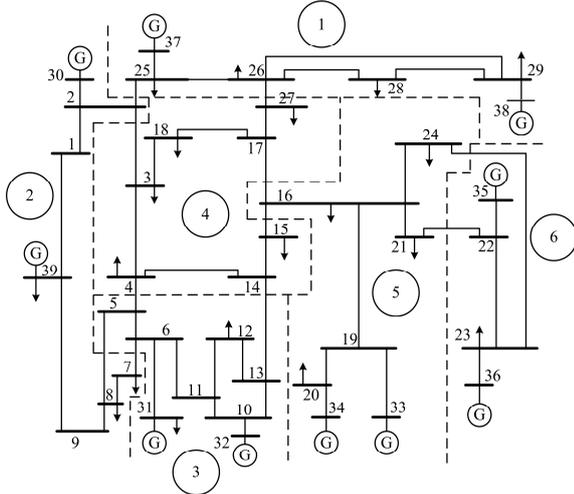


图 5 新英格兰 39 节点系统分区图

Fig. 5 Partitioning of New England 39-bus system

由系统分区，可以得到分区联络线，并将结果与文献[15]搜索得到的新英格兰 39 节点系统脆弱线路进行对比，如表 2 所示。

表 2 分区联络线与脆弱线路

Table 2 Tie-lines and critical lines

本文搜索分区联络线	l_{2-3} 、 l_{2-25} 、 l_{4-5} 、 l_{5-8} 、 l_{6-7} 、 l_{15-16} 、 l_{16-17} 、 l_{21-22} 、 l_{23-24} 、 l_{26-27}
文献[15]得到脆弱线路	l_{2-25} 、 l_{15-16} 、 l_{16-17} 、 l_{21-22}

由表 2 可知，采用本文算法进行系统分区，得到的分区联络线能包含系统全部的脆弱线路。因此基于 AP 算法的系统分区，能够体现系统的脆弱环节，符合输电断面的特征 2。

3.2 输电断面搜索与关键性排序

根据潮流计算结果，结合图 5 得到的系统分区，可以得到含潮流方向的分区图，如图 6 所示。

运用图论中基本割集的搜索方法，结合本文提出的针对相应线路生成树的约束条件，得到各条联

络线所在断面。运用 BPA 软件对上面搜索出的输电断面的极限传输功率进行计算，根据式(6)计算各断面的安全裕度，按安全裕度从小到大进行排序，结果见表 3。

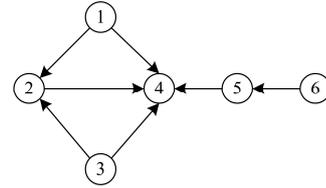


图 6 分区系统

Fig. 6 Partitioning of system

表 3 系统断面搜索结果

Table 3 Transmission sections of New England 39-bus system

排序	输电断面	断面功率/MW	安全裕度(%)
1	l_{2-3} 、 l_{4-5} 、 l_{13-14} 、 l_{26-27}	1093	35.7
2	l_{4-5} 、 l_{5-8} 、 l_{6-7} 、 l_{13-14}	1306	39.2
3	l_{21-22} 、 l_{23-24}	957	46.4
4	l_{15-16} 、 l_{16-17}	493	71.2
5	l_{2-25} 、 l_{26-27}	501	76.6

由表 3 可以看出，断面 1 安全裕度最小，其重要程度最高。在电网中，断面 1 是全网最关键的受电断面，承担着大电源集中区(包含发电机节点 b_{30} 、 b_{31} 、 b_{32} 、 b_{37} 、 b_{38} 、 b_{39})向负荷集中区 4 送电的主要任务，断开该断面，将导致系统暂态失稳。断面 2 是发电机节点 b_{31} 、 b_{32} 的功率送出断面，其中节点 b_{31} 为平衡节点，对系统起到功率平衡的作用，断开该断面，将导致两个分区子系统潮流无法收敛。断面 3 承受着较大的功率输送任务，支路 l_{21-22} 、 l_{23-24} 间的潮流转移因子很大($\lambda_{21-22,23-24}=1.02$)，其开断必将引起潮流大范围转移，对电网安全稳定构成严重威胁。断面 4、5 是局部发电机的电能外送断面，对电力系统的功率供应至关重要，其关键程度仅次于关键断面 1、2、3。这表明本文算法搜索得到的关键断面和排序结果符合电网实际，验证了该算法的有效性。

4 结论

本文提出了综合考虑线路数数和支路潮流的线路权重生成方法，通过 Dijkstra 算法构建系统的相似度矩阵，运用 AP 算法对系统进行分区。在分区基础上，考虑生成树生成约束条件，结合图论中基本割集搜索方法，快速搜索电网关键输电断面，并根据断面安全裕度指标，对断面排序。以新英格兰 39 节点为例，验证了本文方法的有效性。

参考文献

- [1] 刘振亚, 张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.
- [2] 徐岩, 韩平. 防止距离 III 段保护因过负荷误动方法的分析与改进[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 1-7.
XU Yan, HAN Ping. Analysis and improvement for the scheme to prevent zone III distance protection from incorrect operation caused by non-fault overload[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 1-7.
- [3] 董新洲, 曹润彬, 王宾, 等. 印度大停电与继电保护的三大功能[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 19-25.
DONG Xinzhou, CAO Runbin, WANG Bin, et al. India blackout and three functions of protective relay[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 19-25.
- [4] 刘友波, 胡斌, 刘俊勇, 等. 电力系统连锁故障分析理论与应用(一)——相关理论方法与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(9): 148-155.
LIU Youbo, HU Bin, LIU Junyong, et al. Power system cascading failure analysis theories and application I —— related theories and applications[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(9): 148-155.
- [5] 黄家栋, 张富春, 周庆捷. 基于输电断面识别的电力系统连锁故障风险评估模型[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(24): 30-35.
HUANG Jiadong, ZHANG Fuchun, ZHOU Qingjie. Risk assessment model of cascading failures in power system based on identification of transmission section[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 30-35.
- [6] 张富超, 钟成元, 张富春, 等. 基于源流路径剖分的输电断面快速搜索[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 8-13.
ZHANG Fuchao, ZHONG Chengyuan, ZHANG Fuchun, et al. Fast search of transmission section based on path split between sources and flows[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 8-13.
- [7] 张保会, 姚峰, 周德才, 等. 输电断面安全性保护及其关键技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 1-7.
ZHANG Baohui, YAO Feng, ZHOU Decai, et al. Study on security protection of transmission section and its key technologies[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 1-7.
- [8] 任建文, 李刚, 王增平, 等. 基于背离路径的输电断面搜索新算法[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 121-126.
REN Jianwen, LI Gang, WANG Zengping, et al. New algorithm for searching tie lines based on deviation path[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 121-126.
- [9] 王增平, 李刚, 任建文. 基于前 K 最短路径的输电断面搜索新算法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(4): 193-201.
WANG Zengping, LI Gang, REN Jianwen. A new search algorithm for transmission section based on K shortest paths[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 193-201.
- [10] 王涛, 李渝, 顾雪平, 等. 考虑地理分区边界优化的电网关键输电断面辨识[J]. 电工技术学报, 2014, 29(4): 220-228.
WANG Tao, LI Yu, GU Xueping, et al. Identification of the key transmission sections considering optimization of geographical partition boundary for power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(4): 220-228.
- [11] 赵峰, 孙宏斌, 张伯明. 基于电气分区的输电断面及其自动发现[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(5): 42-46.
ZHAO Feng, SUN Hongbin, ZHANG Boming. Electrical zone division based automatic discovery of flowgates[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(5): 42-46.
- [12] 侯俊贤, 韩民晓, 董毅峰, 等. 基于子网络收缩的输电断面搜索方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 92-97.
HOU Junxian, HAN Minxiao, DONG Yifeng, et al. Transmission section searching method based on power system sub-network combination[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 92-97.
- [13] 周德才, 张保会, 姚峰, 等. 基于图论的输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 32-38.
ZHOU Decai, ZHANG Baohui, YAO Feng, et al. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 32-38.
- [14] 罗钢, 陈金富, 石东源, 等. 基于复杂网络理论的关键输电断面分析[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(25): 147-155.
LUO Gang, CHEN Jinfu, SHI Dongyuan, et al. Key transmission sections analysis based on complex network theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(25): 147-155.
- [15] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-5.
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of critical lines for large-scale power system based on complex network theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-5.

收稿日期: 2016-04-11; 修回日期: 2016-07-25

作者简介:

何培颖(1991-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定与控制; E-mail: he_peiyong@sztu.edu.cn

房鑫炎(1963-), 男, 教授, 研究方向为电力系统安全与继电保护。E-mail: xyfang2000@sztu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)