

# 基于双向邻接路径和多支路断开的快速潮流转移识别

聂宏展, 刘 蕾

(东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林 132012)

**摘 要:** 为了加快输电断面搜索速度, 提出了一种基于双向邻接路径的输电断面搜索方法. 利用双向邻接路径算法搜索前  $K$  最短路径, 对  $K$  的取值进行优化. 基于叠加定理分析多支路断开情况下的潮流转移特点, 并推导在多支路断开情况下线路功率变化量的表达式, 估算潮流转移后线路的功率. 定义并结合危险系数选取危险线路集. New England 39 节点系统的仿真结果表明, 此方法有效避免线路漏选, 并适用于多支路断开情况, 无需对全网进行计算分析, 减小了大量的计算量, 满足搜索的快速性和全面性, 为过负荷控制做充分准备, 对预防连锁跳闸事故的发生意义重大.

**关 键 词:** 双向邻接路径; 前  $K$  最短路径; 多支路断开; 潮流转移系数; 危险线路集

**中图分类号:** TM732; TM712

**文献标识码:** A

近年来, 国外频繁发生大面积停电事故. 根据现阶段研究, 发生这些事故主要是由于故障线路的保护设备动作后, 导致潮流转移到其他线路, 造成其它线路过载, 进而它们的保护设备动作接连跳闸, 最终导致大面积停电<sup>[1~2]</sup>. 而在实际情况中, 在系统发生潮流转移后, 只有少数线路的功率会发生较大变化, 大部分线路受到的影响不大, 不会因为过载而发生保护设备动作的情况<sup>[3~5]</sup>. 若发生故障后, 对整个网络进行重新计算, 则需要消耗大量时间, 并且非常复杂. 若能快速找出受潮流转移影响较大的输电断面, 进行局部分析, 可以节约大量时间, 对预防大面积停电事故的发生具有重要意义.

目前, 针对单支路断开的研究相对较多, 但仍存在不足之处<sup>[6~12]</sup>. 文献[6]对输电断面进行定义, 简化电力网络并进行分区, 利用简单的矩阵计算搜索受潮流转移影响严重的区域之间输电断面, 但该方法不能搜索到区内支路. 文献[7]通过分支界限来搜索切除线路节点之间的最短路径, 但该方法只能搜索到一条路径, 会漏选部分关键输电断面. 文献[8]通过随机聚类方法对所有线路功率进行分类, 进而获得输电断面, 该方法计算量太大, 用时较长. 针对多支路断开的研究相对较少, 一旦发生该故障, 电网会发生连锁跳闸, 所以此类故障的研究对预防连锁跳闸具有重要意义<sup>[13~14]</sup>. 文献[13]利用补偿原理推导支路开端分布因子的计算方法, 改进严重度函数, 通过过载严重度指标选取关键支路集, 但计算过程繁琐, 降低了搜索的快速性. 文献[14]采用背离路径算法确定最短路径集, 结合多支路切除的潮流转移特征, 重新确定  $K$  的取值原则, 该方法会多选出一些无关路径, 并且无法适用与两条以上的多支路断开.

本文采用了基于双向邻接路径算法的输电断面搜索, 求得源节点与末节点之间的第一最短路径, 把第一最短路径中的节点及其邻接点作为搜索点, 同时求搜索点到源节点、末节点的双向邻接路径, 根据  $K$  值的选取原则列出前  $K$  条最短路径, 既防止搜索出许多无关线路, 又避免漏选关键线路. 当多支路断

收稿日期: 2018-01-11

基金项目: 国家自然科学基金(51261130471)

第一作者: 聂宏展(1962-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向: 电力系统运行优化、继电保护

通讯作者: 刘 蕾(1994-), 女, 在读硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统保护与控制

电子邮箱: 512410505@qq.com(聂宏展); 835718441@qq.com(刘蕾)

开时,潮流转移分量可分解为单支路断开的叠加,推导多支路断开情况下线路功率变化量的表达式. 估算潮流转移后的线路功率,选取接近功率极限及超过功率极限的线路作为危险线路集. 与前述文献相比,本文在以下方面做出了改进:提出了基于双向邻接路径的输电断面搜索算法;改进  $K$  值的选取方案;适用于多支路断开情况.

## 1 支路断开潮流转移分析

### 1.1 支路断开等效网络

如图 1(a) 所示的系统网络图中,假设支路 4 - 5 断开后,三个发电机输出不变的情况下,不计网络中非线性元件,节点间传输功率不发生变化,只不过是传输路径发生变化,称为潮流转移. 由叠加定理可知,支路 4 - 5 断开后,支路 4 - 5 可以由一个电流源  $I_s$  代替,大小  $I_s = I_{4-5}$ ,方向与未断开前电流方向相反. 等效网络图,如图 1(b) 所示.

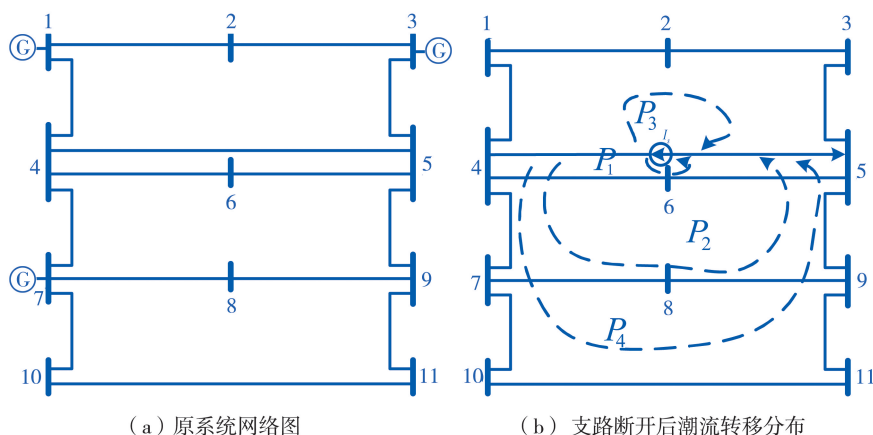


图 1 支路 4 - 5 断开等效网络图

### 1.2 潮流转移系数

当网络中只有一个电流源,其它参数确定,各支路的电流大小只和电流源大小有关,并且具有线性关系,可表示为

$$\Delta I_{ij} = \lambda_{i-j} I_s, \quad (1)$$

公式中: $\Delta I_{ij}$  为支路  $i-j$  上的电流增量; $I_s$  为断开支路的最初电流大小; $\lambda_{i-j}$  为支路  $i-j$  的潮流转移系数,潮流重新分配后,有的支路并不会增大,反而减小,所以  $\lambda_{i-j} \in (-1, 1)$ .

参照电力系统静态安全分析中的分布系数法,某一支路  $a-b$  断开时,支路  $i-j$  的潮流转移系数为

$$\lambda_{i-j} = \frac{x_{ab}(X_{ia} - X_{ib} - X_{ja} + X_{jb})}{x_{ij}(x_{ab} - X_{aa} - X_{bb} + 2X_{ab})}, \quad (2)$$

公式中: $X_{ia}$ 、 $X_{ib}$ 、 $X_{aa}$ 、 $X_{bb}$ 、 $X_{ab}$ 、 $X_{ja}$ 、 $X_{jb}$  为网络阻抗矩阵中对应位置的元素, $Z$  用  $X$  代替; $x_{ab}$ 、 $x_{ij}$  分别为支路  $a-b$ 、 $i-j$  的电抗.

### 1.3 多支路断开潮流转移分量

当网络中有  $m$  条支路断开时,可以看作  $m$  个单支路断开,通过叠加定理计算总潮流转移分量. 如图 2 所示,支路  $l_1$  和  $l_2$  因故障切除,支路  $l_3$  是网络中除去支路  $l_1$ 、 $l_2$  的任意支路. 支路  $l_3$  最终的功率变化量可分为以下三部分( $P_{l_2-l_1}^{(m)}$ 、 $P_{l_1-l_2}^{(m)}$  分别表示支路  $l_1$  第  $m$  次功率转移到支路  $l_2$  上、支路  $l_2$  第  $m$  次功率转移到支路  $l_1$  上):

- (1) 支路  $l_1$ 、 $l_2$  的原始功率分别以转移系数  $\lambda_{l_3-l_1}$ 、 $\lambda_{l_3-l_2}$  转移到支路  $l_3$  上;
- (2) 支路  $l_1$  上的功率以转移系数  $\lambda_{l_2-l_1}$  转移到支路  $l_2$ , 再由支路  $l_2$  以转移系数  $\lambda_{l_3-l_2}$  转移到  $l_3$ ;
- (3) 支路  $l_2$  上的功率以转移系数  $\lambda_{l_1-l_2}$  转移到支路  $l_1$ , 再由支路  $l_1$  以转移系数  $\lambda_{l_3-l_1}$  转移到  $l_3$ .

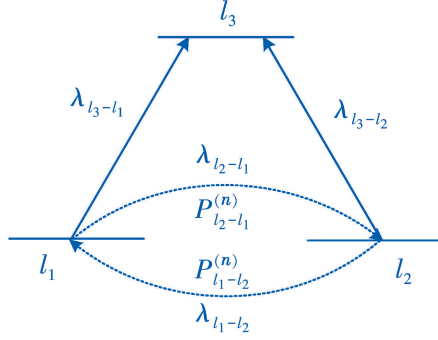


图 2 多支路断开潮流转移分析

以图 2 为例,图 2 中有两个支路断开,即  $m = 2$ . 推导断开支路转移到支路  $l_3$  的功率变化量为

$$\Delta P_3 = \lambda_{l_3-l_1} (P_{l_1} + P_{l_1-l_2}^{(1)} + P_{l_1-l_2}^{(2)}) + \lambda_{l_3-l_2} (P_{l_2} + P_{l_2-l_1}^{(1)} + P_{l_2-l_1}^{(2)}), \quad (3)$$

通过公式(3) 可以推导出系统若断开  $m$  条线路,支路  $l$  的功率变化量为

$$\begin{aligned} \Delta P_l &= \lambda_{l-l_1} (P_{l_1} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{l_1-l_2}^{(m)} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{l_1-l_3}^{(m)} + \cdots + \sum_{m=1}^{\infty} P_{l_1-l_m}^{(m)}) + \lambda_{l-l_2} (P_{l_2} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{l_2-l_1}^{(m)} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{l_2-l_3}^{(m)} + \cdots + \\ &\quad \sum_{m=1}^{\infty} P_{l_2-l_m}^{(m)}) + \cdots + \lambda_{l-l_m} (P_{l_m} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{l_m-l_1}^{(m)} + \sum_{m=1}^{\infty} P_{l_m-l_2}^{(m)} + \cdots + \sum_{m=1}^{\infty} P_{l_m-l_{m-1}}^{(m)}) \\ &= \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \lambda_{l-l_m} \left( P_{l_m} + \sum_{j=1}^m \sum_{m \neq j} P_{l_m-l_j}^{(m)} \right) \right], \end{aligned} \quad (4)$$

公式中:  $P_{l_m-l_j}^{(m)}$  通过叠加定理分解为两部分. 分别为

(1)  $P_{l_m} = 0$  时,

$$P_{l_m-l_j}^{(m)} = \lambda_{l_j-l_m} \lambda_{l_m-l_j} P_{l_m-l_j}^{(m-1)}, \quad P_{l_m-l_j}^{(1)} = \lambda_{l_m-l_j} P_{l_j}, \quad (5)$$

$$P_{l_m-l_j}^{(m)} = \lambda_{l_j-l_m}^{m-1} \lambda_{l_m-l_j}^m P_{l_j}. \quad (6)$$

(2)  $P_{l_j} = 0$  时,

$$P_{l_m-l_j}^{(m)} = \lambda_{l_j-l_m} \lambda_{l_m-l_j} P_{l_m-l_j}^{(m-1)}, \quad P_{l_m-l_j}^{(1)} = \lambda_{l_m-l_j} \lambda_{l_j-l_m} P_{l_m}, \quad (7)$$

$$P_{l_m-l_j}^{(m)} = \lambda_{l_j-l_m}^m \lambda_{l_m-l_j}^m P_{l_j}. \quad (8)$$

将公式(6) 和公式(8) 相加可得  $P_{l_m-l_j}^{(m)}$  的表达式为

$$P_{l_m-l_j}^{(m)} = (\lambda_{l_m-l_j} P_{l_j} + \lambda_{l_j-l_m} \lambda_{l_m-l_j} P_{l_m}) \lambda_{l_j-l_m}^{m-1} \lambda_{l_m-l_j}^{m-1}. \quad (9)$$

将公式(9) 代入公式(4) 得:

$$\Delta P_l = \sum_{m=1}^{\infty} \left[ \lambda_{l-l_m} \left( P_{l_m} + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{j=1}^m (\lambda_{l_m-l_j} P_{l_j} + \lambda_{l_j-l_m} \lambda_{l_m-l_j} P_{l_m}) \lambda_{l_j-l_m}^{m-1} \lambda_{l_m-l_j}^{m-1} \right) \right]. \quad (10)$$

由公式(10) 得出,潮流转移分量  $\Delta P_l$  可以通过初始数据计算求得,无需重新进行复杂的潮流计算,

缩短了估算时间.

#### 1.4 危险线路集的确定

由公式(2)可以看出,潮流转移系数只和网络中参数有关,潮流转移系数的大小能够反映断开线路对其它线路潮流的变化程度,当某一支路断开时,网络中支路的潮流转移系数  $\lambda_{i-j}$  大于某一设定值  $\delta$  的全部支路为关键输电断面. 若  $\lambda_{i-j}$  为负值,那么支路  $i-j$  上的潮流将减小,因此不会引起该线路的过载,根据实际情况, $\delta$ 一般取在 0.2 ~ 0.3 之间<sup>[9]</sup>,同时考虑算法的效率,本文选取 0.3. 潮流转移后,支路  $i-j$  的功率为

$$P_{ij}^{(1)} = P_{ij}^{(0)} + \Delta P_{ij}, \quad (11)$$

公式中: $P_{ij}^{(0)}$  为支路  $i-j$  初始功率; $P_{ij}^{(1)}$  为潮流转移后支路  $i-j$  的功率; $\Delta P_{ij}$  为支路  $i-j$  功率变化量. 其中  $\Delta P_{ij}$  表达式为

$$\Delta P_{ij} = \lambda_{i-j} P_{ab}, \quad (12)$$

公式中: $P_{ab}$  为支路  $a-b$  未断开时的传输功率.

当线路传输功率接近线路功率极限时,视为危险线路,组成危险线路集. 本文定义危险系数

$$\alpha_{i-j} = \frac{P_{ij}^{(1)}}{P_{ij\max}}, \quad (13)$$

公式中: $P_{ij\max}$  为支路  $i-j$  功率极限. 若  $\alpha_{i-j} > 1$ ,则表示支路  $i-j$  的功率已经超过线路功率极限. 由于要留有一定的安全裕度,本文定为当  $\alpha_{i-j} > 0.8$  或  $\alpha_{i-j} > 1$  时,把支路  $i-j$  列为危险线路集.

## 2 邻接路径的图论分析

### 2.1 图论分析

电力系统可以由一个图表示出来,研究网络的拓扑关系,图表示为  $G(V, E)$ ,  $V$  代表点的集合,即网络中的母线; $E$  代表边的集合,即网络中的输电线路. 若边有方向,则  $G$  为有向图;若边无方向,则  $G$  为无向图<sup>[12]</sup>. 本文给图的每条边赋予权值,用权值表示边的大小.

### 2.2 加权邻接矩阵

设  $G$  有  $n$  个节点,则  $G$  的加权邻接矩阵  $A$  的每个元素为

$$\begin{aligned} & [0, i=j \\ & a_{ij} = \{x_{ij}, i \neq j(v_i, v_j) \in E \\ & [\infty, i \neq j(v_i, v_j) \notin E \end{aligned} \quad (14)$$

公式中: $x_{ij}$  为边的权值; $\infty$  为节点  $i$  和节点  $j$  之间没有支路连接. 本文用各支路的电抗值表示边的权值,图  $G$  是一个无向图,加权邻接矩阵  $A$  应为对称矩阵.

### 2.3 双向邻接路径

顶点  $v_i, v_j$  之间存在一条边,则这两个顶点互为邻接点. 本文定义由互为邻接点的两个顶点分别到其他同一顶点的路径称为邻接路径,即顶点  $v_i, v_j$  分别到顶点  $v_s$  的两条路径  $(v_s, v_i), (v_s, v_j)$  互为邻接路径;则顶点  $v_i$  到源节点  $v_s$ 、末节点  $v_t$  的路径  $(v_s, v_i), (v_i, v_t)$  与顶点  $v_j$  到源节点  $v_s$ 、末节点  $v_t$  的路径  $(v_s, v_j), (v_j, v_t)$  互为双向邻接路径.

### 3 基于双向邻接路径的输电断面快速搜索算法

目前,已经有很多学者研究前  $K$  最短路径的问题. 本文设计了一种搜索前  $K$  条最短路径新方法. 此方法采用双向邻接路径算法搜索输电断面,设定搜索点,同时搜索到源节点、目的节点的最短路径,缩短时间.

#### 3.1 $K$ 的选取原则

经过大量的仿真实验可以得出,受潮流转移影响较大的路径为前 3 条最短路径,甚至部分只对前 2 条最短路径产生影响较大. 为了避免选出多余支路,采用以下判据来判断是否要选出第 3 最短路径

$$\frac{L_3}{L_1} \leq M, \quad (15)$$

公式中: $L_1$  为两点间第 1 最短路径的长度; $L_3$  为两点间第 3 最短路径的长度; $M$  为路径长度的倍数. 若  $\frac{L_3}{L_1} \leq M$ , 则  $K = 3$ ; 若  $\frac{L_3}{L_1} \geq M$ , 则  $K = 2$ .

文献[12] 将  $M$  取为 3, 但经过大量仿真实验验证, 若  $M = 3$ , 会选出大量无关路径. 本文  $M$  取 2, 潮流转移的大小与每条路径的电抗值相关, 可近似为两者成反比, 即路径电抗值越大, 潮流转移越小. 所以  $M = \left\langle \frac{1}{\delta} \right\rangle - 1 = 2$ , 对  $\frac{1}{\delta}$  进行四舍五入取整, 例如  $\left\langle 2.6 \right\rangle = 3$ ,  $\left\langle 2.3 \right\rangle = 2$ . 而式中减 1 是因为第 1 最短路径的潮流转移系数一定是最大, 转移值超过了均值, 若后面的路径长度超出第 1 最短路径过多, 其受到的影响很小, 从而做出的调整.

由于多支路断开可以通过叠加定理分解为每条支路分别断开, 故选取这些支路在单独断开时所选取的路径, 取组成这些路径的支路并集为输电断面.

#### 3.2 算法流程

算法流程如下, 输电断面搜索过程, 如图 3 所示.

(1) 把网络化成拓扑图, 通过不断搜索图的边界点来消去悬挂节点, 线路作为图的边, 边的长度用线路的电抗表示, 形成加权邻接矩阵;

(2) 利用 Dijkstra 算法<sup>[15]</sup> (从一个顶点到其余各顶点的最短路径算法) 搜索故障线路的两端点 ( $v_s, v_t$ ) 之间最短路径 Path(1), 长度为  $L_1$ , 将 Path(1) 存入有序序列  $sq$  中, 长度最短排在最前面, Path(1) 的每一个节点形成节点集  $R_i$ , 这些节点的邻接点形成邻接点集  $D_i, D_i = P_{i-1} \cap \overline{R_i}, P_{i-1}$  为前行节点  $v_{i-1}$  的邻接点集,  $\overline{R_i}$  为  $R_i$  的补集;

(3)  $G_1 = \Phi, K = 1$ . 邻接点  $v'_i (v'_i \in D_i)$  为搜索点, 删除图中 Path(1) 中节点相连的边, 再次调用 Dijkstra 算法搜索  $(v_s, v'_i) \setminus (v'_i, v_t)$  最短路径, 即为 Path(1) 的双向邻接路径. 并记录搜索点的前置距离  $\text{Lead length}(i)$  和后置距离  $\text{Rear length}(i)$ ;

(4) 对同一搜索点的前置距离和后置距离进行组合并排序, 存入  $G_1$ , 若  $G_1 = \Phi$ , 停止运行;

(5)  $K = K + 1$ ; 判断  $N$  是否小于等于 2, 是则从  $G_1$  中找出最短路径, 记为 Path( $K$ ), 存入  $sq$  中, 从  $G_1$  中删除 Path( $K$ ); 否则判断  $\frac{L_N}{L_1}$  是否大于 2, 是则终止运行, 否则将 Path( $K$ ) 存入  $sq$  中. 若  $G_1 = \Phi$ , 停止运行.

4 仿真算例

本文以 New England 10 机 39 节点系统为例,验证算法的可行性. 系统的拓扑图,如图 4 所示. 删除不能构成回路的节点.

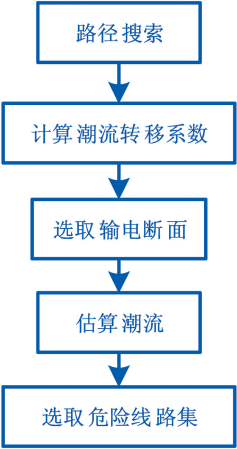


图 3 潮流转移识别流程

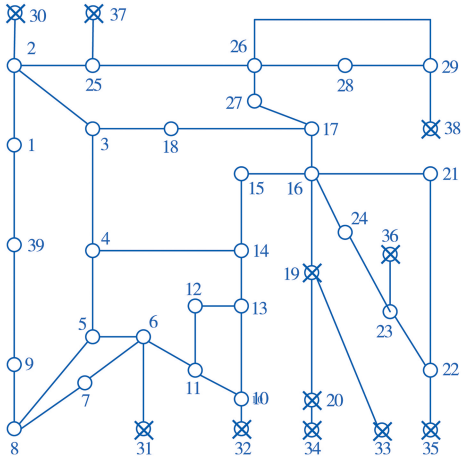


图 4 New England 39 节点系统拓扑图

4.1 算例 1:单支路断开

假设支路 10 - 13 断开,根据公式(15) 判断条件, $\frac{L_3}{L_1} \leq 2$ ,故应选出第三条最短路径. 仿真结果如表 1 所示,由此可得,最终选取的输电断面为{ 10 - 11,11 - 6,5 - 4,6 - 5,11 - 12,12 - 13 }.

表 1 支路 10-13 断开时选取输电断面

路径	长度	潮流转移系数	输电断面
10-11-6-5-4-14-13	0.050 9	$\lambda_{10-11}=1$ $\lambda_{11-6}=0.671\ 4$	10-11 11-6
10-11-6-7-8-5-4-14-13	0.073 3	$\lambda_{13-14}=0.671\ 4$ $\lambda_{5-4}=0.605\ 0$ $\lambda_{6-5}=0.581\ 3$ $\lambda_{14-4}=0.559\ 1$	5-4 6-5
10-11-12-13	0.091 3	$\lambda_{11-12}=\lambda_{12-13}=0.328\ 6$ $\lambda_{6-7}=\lambda_{7-8}=0.090\ 9$ $\lambda_{5-8}=-0.023\ 8$	11-12 12-13

若按照文献[5]的方法对系统进行分区,既由于分成多个区域耗费较多时间,又会漏选支路 6-5 和支路 5-4. 按照文献[7]的方法对系统进行搜索,只能搜索出一条最短路径,这样会漏选关键支路 11-12 和支路 12-13. 按照文献[12]的方法判断选取  $K$  值,则会多搜索出一条路径 10-11-6-5-4-3-18-17-16-15-14-13,这样就会多选出支路 4-3,支路 3-18,支路 17-18,支路 16-17,支路 15-16 和支路 14-15,这是因为  $M$  值选取不合理所致.

估算输电断面线路的潮流,与实际潮流做比较,计算误差. 根据公式(15) 计算选取输电断面每条线路的危险系数  $\alpha_{i-j}$ ,选出危险线路集,如表 2 所示.

表 2 支路 10-13 断开时危险线路集选取结果

输电断面	估算潮流/MW	实际潮流/MW	误差	功率极限/MW	危险系数 $\alpha_{i-j}$	危险线路集
10-11	650.00	650.00	0	600	1.083 3	11-6 10-11
11-6	548.14	545.74	2.40	480	1.142 0	
5-4	365.91	364.70	1.21	600	0.609 9	
6-5	696.13	694.42	1.71	1200	0.580 1	
11-12	103.42	104.26	0.84	500	0.206 8	10-11
12-13	94.64	95.73	1.09	500	0.189 3	



本文采用的方法不会出现漏选情况,并且没有产生多余的无关支路,估算潮流误差小于 2%。因本文精确度取小数点后两位,故支路 10-11 的估算误差为 0。

4.2 算例 2:多支路断开

假设支路 5-6,10-13,17-18 断开,由于多支路断开可以视为单支路断开的叠加,所以只需搜索当这三条线路分别断开时的前  $K$  条最短路径,选取这三种情况下的输电断面,综合三条支路分别断开时选取的输电断面,利用公式(12)估算这三条支路同时断开后输电断面所包含支路的潮流,与实际潮流作对比,计算估算的误差,并根据公式(13)计算输电断面所包含支路的危险系数,最终选出危险线路集。支路 10-13 断开时选取的输电断面如表 1 所示;支路 5-6 和支路 17-18 分别断开时选取的输电断面,如表 3 所示;选取最终的危险线路集,如表 4 所示。

表 3 支路 5-6,支路 17-18 断开时选取输电断面

线路	路径	输电断面
5-6	5-8-7-6	7-8,6-7,13-14
	5-4-14-13-10-11-6	
17-18	17-16-15-14-4-3-18	16-15,14-4,3-18,17-27,25-2,2-3
	17-27-26-25-2-3-18	

表 4 支路 5-6,支路 17-18 断开时危险线路集选取结果

输电断面	估算潮流/MW	实际潮流/MW	误差	功率极限/MW	危险系数	危险线路集
10-11	650.00	650.00	0	600	1.083 3	
11-6	445.48	447.74	1.94	480	0.928 1	
5-4	235.07	233.53	1.54	600	0.391 8	
11-12	201.01	202.76	1.75	500	0.402 0	
12-13	191.89	193.73	1.84	500	0.383 8	6-7
7-8	835.34	838.97	3.63	900	0.928 2	10-11
6-7	1 074.67	1072.77	1.90	900	1.194 1	7-8
13-14	192.36	193.73	1.37	600	0.320 6	
16-15	411.44	414.57	3.13	600	0.685 7	11-6
14-4	287.13	288.30	1.17	500	0.574 3	2-3
3-18	159.69	158.00	1.69	500	0.319 4	
17-27	95.37	96.33	0.96	600	0.160 6	
25-2	335.04	332.83	2.21	500	0.670 0	
2-3	456.98	458.16	1.18	500	0.914 0	

由此可见,本文估算潮流误差比文献[13]的估算潮流误差小于 2%,能更准确地估算线路潮流,文献[14]无法适用于两条以上支路断开的情况,且有局限性,并且会搜索出大量无关支路;由此说明,把多支路断开视为单支路分别断开的叠加是可行的,不会漏选危险系数高的线路,并且缩小了计算分析范围,大大减少了计算工作量。

5 结 论

本文提出一种基于双向邻接路径的输电断面搜索方法,优化了  $K$  值的选取原则,选取少数几条路径就可找出受影响较大的线路,并且不会产生漏选。分析多支路断开时潮流转移情况,利用初始数据估算线路的潮流变化量,并且估算误差极小,通过危险系数选取危险线路集,利用潮流转移系数和危险系数两方面确定受潮流转移影响大的线路,保证了结果的准确性。

当电网中发生故障切除线路时,缩小分析目标,无需对全网进行复杂的潮流计算,对预防连锁跳闸事故的发生具有重要意义。

## 参 考 文 献

- [1] 汤涌,卜广全,易俊. 印度“7.30”、“7.31”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):167-174,23.
- [2] 林伟芳,汤涌,孙华东,等. 巴西“2·4”大停电事故及对电网安全稳定运行的启示[J]. 电力系统自动化,2011,35(9):1-5.
- [3] Zhang Baohui, Ha Zhiguo, Bo Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1):121-127.
- [4] Mojdeh Abdi-Khorsand, Vijay Vittal. Identification of critical protection functions for transient stability studies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, PP(99):1-9.
- [5] 何志勤,张哲,尹项根,等. 电力系统广域继电保护研究综述[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):125-130.
- [6] 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.
- [7] 倪宏坤,徐玉琴. 基于动态规划原理分支界限算法的关键输电断面搜索方法[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2009,36(4):11-15.
- [8] 林济铿,杨添凯,胡世俊,等. 基于模糊聚类 and 最短路径的关键输电断面确定新方法[J]. 电力系统自动化,2015,39(5):134-141.
- [9] 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):121-127.
- [10] 和敬涵,王紫琪,张大海. 基于网络分割及旁侧路径搜索的输电断面识别方法[J]. 电力自动化设备,2017,37(7):1-7.
- [11] 聂宏展,林启春,林小青,等. 基于双向广度优先法的输电断面搜索方法[J]. 东北电力大学学报,2017,37(3):13-18.
- [12] 苗世洪,马帅,尚亚男,等. 基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法[J]. 电力系统自动化,2014,38(2):39-45.
- [13] 聂宏展,袁晓丹,张会强,等. 基于多支路断开和关键支路集的快速潮流转移识别[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(17):38-43.
- [14] 任建文,何培成. 基于多支路切除和背离路径的潮流转移识别算法[J]. 华北电力大学学报:自然科学版,2016,43(6):1-6.
- [15] 王乙斐,唐飞,刘涤尘,等. 基于 Dijkstra 算法的最优解列断面快速搜索方法[J]. 电力自动化设备,2015,35(4):126-131.
- [16] 聂宏展,王叫,马方明,等. 基于潮流转移识别的紧急减载控制策略研究[J]. 东北电力大学学报,2016,36(4):1-6.
- [17] 任建文,何培成,李刚. 基于虚拟支路模型与 FTIL 的多支路断开潮流转移搜索新算法[J]. 电网技术,2017,41(1):194-200.
- [18] 徐岩,邹静,王祥晖. 基于 N-1 原则的输电断面热稳定功率极限评估[J]. 电力系统及其自动化学报,2017,29(1):13-17.
- [19] 牟颖,张保会,薄志谦. 防止输电断面连锁过载的快速控制算法[J]. 电力系统自动化,2017,41(3):39-45.
- [20] 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.

## Fast Power Flow Transferring Based on Bidirectional Adjacent Path and Multi-branch Disconnection

Nie Hongzhan, Liu Lei

(Electrical Engineering College, Northeast Electric Power University, Jilin Jilin 132012)

**Abstract:** In order to speed up transmission section search speed, a algorithm for searching transmission section based on bidirectional adjacent path was given in the paper. The method show system network diagram by weighted adjacent matrix, searching for the first k shortest paths based on bidirectional adjacent path, optimize the value of k. Analyzing power flow transfer in the case of multi-branch disconnection based on superposition theorem, deducing the expression of line power variation in case of multi-branch disconnection. Define and combine danger factor, seleted dangerous line set. New England 39 node system simulation results shows, this method can effectively avoid line leakage and be suitable for multi-branch disconnection, don't need to analyze the whole network, reduce the amount of calculation, satisfying the rapidity and comprehensiveness of the search, add full preparation for overload control. To prevent the occurrence of chain tripping accidents is of great significance.

**Key words:** Bidirectional adjacent path; First  $K$  shortest paths; Multi-branch disconnection; Power flow transfer coefficient; Dangerous line set