

多支路同时断开潮流转移输电断面快速搜索

程若发, 付 鑫

(南昌航空大学信息工程学院, 江西 南昌 330063)

**摘要:** 针对多支路断开后引起的有功潮流转移问题, 定义并提出一种基于虚拟支路模型与潮流越限风险指数的多支路同时开断输电断面搜索新方法。建立了双支路断开的潮流转移虚拟模型: 在双支路断开时, 将其等效为一条虚拟支路, 并结合有功潮流的虚拟折返过程推导出等效支路的虚拟开断分布系数; 多支路同时断开时, 在双支路断开的基础上, 将虚拟支路与第三条支路组成虚拟双支路模型, 推导出下一代虚拟支路的开断分布系数。结合虚拟开断分布系数定义得到各线路的潮流越限风险指数, 通过线路的潮流越限风险指数对潮流转移区域中的线路进行筛选, 得到组成输电断面的所有支路。通过 IEEE39 节点系统进行仿真计算, 结果表明, 本文所提方法在保证结果准确性的前提下, 较其他方法更加具有时效性。

**关键词:** 虚拟开断分布系数; 潮流越限风险指数; 输电断面; 潮流转移区域; 虚拟潮流折返

**DOI:** 10. 12067/ATEEE1906011      **文章编号:** 1003-3076(2020)07-0062-10      **中图分类号:** TM72

1 引言

近些年, 电力系统大面积停电事故屡有发生<sup>[1,2]</sup>。文献[1]中由于暴风雨造成南澳大利亚州联络线跳闸, 进一步导致风电机组大规模脱网等一系列事故, 进而最终演变成全州的大停电, 造成了巨大的经济损失和严重的社会影响。文献[2]中由于山火导致两条输电线路发生故障并跳闸, 引起电网欠压以及系统振荡, 进而导致电网发生解列, 共计造成各州负荷损失 953MW, 虽然属于小范围停电事故, 但对社会还是造成了一定的负面影响, 同时也损害了电力公司的利益。通过对大停电事故的分析可知, 绝大多数原因为电力系统中的线路由于某种原因断开或跳闸, 造成网络中的潮流发生转移, 而传统的线路后备保护装置基于本地的测量信息, 在未顾及线路切除对整个系统影响的情况下直接将过载线路切除, 从而产生更大范围的潮流转移, 造成更多的线路过载, 导致系统发生连锁跳闸事故。因此, 快速判断线路断开后发生的潮流转移是否会导致新的线路发生过载, 并迅速闭锁过载线路的后备保护装置, 进一步采取控制措施消除过载, 对预防大停电事故

具有重要的意义。

对输电断面进行监测和控制是维持现代大规模电力系统稳定运行的一个重要手段。目前, 已有大量文献对输电断面的识别进行了研究<sup>[3-8]</sup>。其绝大多数的研究内容主要集中在单一支路断开时的输电断面搜索, 极少涉及多支路断开时潮流转移的断面发现<sup>[9,10]</sup>。而国内电网大部分都不能达到多支路同时断开的严重故障强度<sup>[11]</sup>, 因此对多支路断开时输电断面的搜索, 对预防大停电事故尤为重要。

在单一支路断开的输电断面识别中, 文献[3]首先计算其他线路与关键线路的差异系数, 通过差异系数进行排序, 将排序后的线路中有功增加因子大于设定阈值的线路作为输电断面的组成线路。文献[4,6,7]都是通过分析线路的功率组成来确定相关输电断面。文献[4]通过对各条线路的功率组成进行分析, 通过模糊聚类算法得到系统的初始断面, 然后通过汽车接力算法搜索最短回路并计算线路的关键度指标, 得到系统的关键输电断面; 文献[6]通过离差平方和的方法对线路进行聚类分析, 搜索与故障线路分为一类且聚类次数最少的线路, 若线路的潮流大于设定阈值, 则为输电断面的组成线路; 文

收稿日期: 2019-06-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(51567019)、江西省教育厅科学技术项目(GJJ150757)

作者简介: 程若发(1971-), 男, 安徽籍, 副教授, 博士, 主要从事电网建模与仿真等方面的研究;

付 鑫(1994-), 男, 江西籍, 硕士研究生, 研究方向为电力系统保护与控制(通讯作者)。

献[7]主要通过模糊聚类的方法进行聚类分析,得到关键线路的并行线路,基于并行线路进行最短路径搜索,得到初始输电断面,结合线路开断分布系数对初始输电断面中的线路进行筛选,得到系统的关键输电断面。

多支路断开的输电断面识别中,文献[9]首先将广度优先搜索策略和节点间的电气距离以及潮流转移密集度相结合,搜索得到潮流转移严重区,然后对潮流转移严重区中支路的潮流增量进行计算,将潮流增量大于设定阈值的支路集合作为线路断开后的输电断面;文献[10]提出了使用等相角并行输电线路的概念,在此基础上通过搜索经过等相角并行输电线路的最短路径,并结合潮流转移危险指数筛选得到潮流转移危险线路;文献[12]提出一种基于广度优先搜索策略以确定关键输电断面,但其要遍历电网中的所有线路和计算所有线路的有功潮流转移系数,对于大电网来说,此方法运算量较大,并不符合实际应用的条件。

针对现有研究的优点和不足,本文提出了基于虚拟支路模型与潮流越限风险指数的多支路同时断开的输电断面快速搜索新方法。其基本思路如下:首先,基于经典的潮流转移虚拟折返过程建立虚拟潮流转移模型,通过模型计算得到其他支路对多条开断线路的等效支路的虚拟开断分布系数(Virtual Branch Disconnection Coefficient, VBDC);通过搜索开断线路两端前  $K$  条最短路径确定潮流转移区域,对于多条开断支路,潮流转移区域为各断开支路的前  $K$  条路径所包含的支路取并集;计算潮流转移区域中各条支路的潮流越限风险指数(Flow Exceeding Risk Index, FERI),FERI 大于设定阈值的线路即为输电断面的组成线路。

本文所提方法首先简化了在多条支路同时断开情况下相关线路开断系数的计算,使其不需要重复计算在线路断开前后网络的阻抗矩阵,此部分可大大减少计算量;且所确定潮流转移区域所包含支路数量也少于其他方法<sup>[9,12]</sup>,后续提出了相关支路评价指标且计算量也相应地更少。因此,本文所提方法相较于其他方法能够使用较少的时间识别出潮流转移输电断面,为后续断面监测及断面过载消除留有更加充分的时间裕度<sup>[13,14]</sup>。

## 2 潮流转移模型

线路的开断分布系数基于直流法和补偿法推导

得到<sup>[15]</sup>,具体表示为:当线路  $l$  断开时,转移到目标线路  $k$  上的潮流与线路  $l$  断开之前的潮流大小的比值,记为  $D_{k-l}$ 。开断分布系数的取值范围为  $0 \sim 1$ ,通常用于衡量其他线路受断开线路影响的大小。

### 2.1 双支路开断模型

在本文中,对于断开时间间隔非常短的两条线路,将其视为同时断开。在双支路同时断开的情况下,计算支路对于某条断开支路的分布系数时必须考虑另外一条支路已断开的情况,传统的方法主要是通过修改网络的节点阻抗矩阵,但在规模较大的电力系统中这将会明显增大计算量。利用潮流虚拟折返过程计算双支路开断分布系数可有效避免上述计算量大的问题,其计算公式如式(1)所示<sup>[16]</sup>:

$$D'_{k-m} = \frac{D_{k-m} + D_{k-n} D_{n-m}}{1 - D_{m-n} D_{n-m}} \quad (1)$$

式中,  $m, n$  为开断支路;  $D'_{k-m}$  为双支路断开之后开断支路  $m$  对支路  $k$  的分布系数。

通过式(1)计算得到的双支路开断时的支路分布系数可用于快速计算其他支路的潮流变化量:

$$\Delta P_k = D'_{k-m} P_m + D'_{k-n} P_n \quad (2)$$

式中,  $\Delta P_k$  为目标支路的潮流变化量;  $P_m, P_n$  分别为支路  $m, n$  断开之前的支路有功潮流。

将断开的双支路  $m, n$  等效为一条虚拟支路  $h$ ,则可得到基于支路  $h$  的其他支路的潮流变化量,如式(3)所示:

$$\Delta P_k = D_{k-h} P_h \quad (3)$$

式中,  $D_{k-h}$  为虚拟支路  $h$  的 VBDC;  $P_h$  为虚拟支路  $h$  的等效初始有功潮流。

对  $D_{k-h}$  的推导如下:假定开断支路  $m, n$  的有功潮流与虚拟支路  $h$  的有功潮流的关系如式(4)、式(5)所示,则结合式(2)、式(3)式可推导出各支路的 VBDC,如(6)式所示:

$$P_m = \alpha P_h \quad (4)$$

$$P_n = \beta P_h \quad (5)$$

$$D_{k-h} = \alpha (D'_{k-m} + D'_{k-n} \left| \frac{P_n}{P_m} \right|) \quad (6)$$

式中,  $\alpha, \beta$  分别为开断支路  $m, n$  与虚拟支路  $h$  的有功潮流比例系数。双支路开断的虚拟潮流转移模型如图1所示。图1中,将开断支路  $m$  和  $n$  等效为虚拟支路  $h$ ,同时在计算出  $m, n$  同时断开后的开断分布系数的基础上,按照式(6)计算出虚拟支路的 VBDC,将问题由双支路断开的情形转化为单支路断开的情况,大大简化了后续的计算。

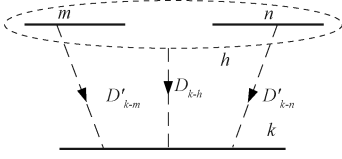


图1 双支路开断虚拟潮流转移模型

Fig.1 Virtual transfer model of double branch removal

对于同时断开的支路数量大于2的情形,由虚拟折返理论可知,断开线路的潮流将在多个开断支路间发生折返过程,随着线路的增加,折返过程也会变得更加复杂。因此,采用类似于双支路开断虚拟模型中的虚拟支路  $h$  来间接进行潮流折返分析。

## 2.2 多支路开断虚拟模型

对于多支路同时断开的情形,本节分析中以3条支路同时断开为例。假设断开的3条支路分别为  $m$ 、 $n$ 、 $q$ ,首先利用2.1节中的双支路开断虚拟模型求得  $m$ 、 $n$  的等效虚拟支路  $h$ ,然后再将支路  $h$  和支路  $q$  组成双支路模型,如图2所示。其中的  $D'_{k-h}$  和  $D'_{k-q}$  表示虚拟支路  $h$  和支路  $q$  断开后,目标支路  $k$  的开断分布系数。

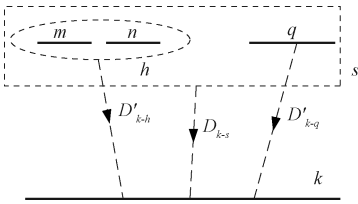


图2 三支路开断虚拟潮流转移模型

Fig.2 Virtual transfer model of triple branch removal

对三支路同时断开的情形进行上述处理,则可将其转化为双支路开断的情况,此时开断支路为虚拟支路  $h$  和支路  $q$ ,运用式(1)即可求出虚拟支路  $h$  对支路  $k$  的开断分布系数  $D'_{k-h}$  和支路  $q$  对支路  $k$  的开断分布系数  $D'_{k-q}$ 。此时即可得到三支路断开后线路  $k$  的有功潮流变化量,如式(7)所示:

$$\Delta P_k = D'_{k-h} P_h + D'_{k-q} P_q \quad (7)$$

式中,  $P_h$ 、 $P_q$  分别为虚拟支路  $h$  和支路  $q$  的等效初始有功潮流。

同双支路开断模型,将虚拟支路  $h$  和支路  $q$  等效为一条虚拟支路  $s$ ,通过所求得的分布系数  $D'_{k-h}$  和  $D'_{k-q}$  即可求出虚拟支路  $s$  对线路  $k$  的 VBDC,其公式推导过程类似于式(4)~式(6),具体如下:

$$\begin{cases} P_h = \theta P_s \\ P_q = \lambda P_s \\ \Delta P_k = D_{k-s} P_s \end{cases} \quad (8)$$

式中,  $\theta$  和  $\lambda$  分别为虚拟支路  $s$  和支路  $h$ 、支路  $q$  之间的初始有功潮流比例系数。

由式(8)可得虚拟支路  $s$  的开断分布系数如式(9)所示:

$$D_{k-s} = \theta(D'_{k-h} + D'_{k-q} | \frac{P_q}{P_m} | \alpha) \quad (9)$$

式中,  $\alpha$  为虚拟支路  $h$  的初始潮流和支路  $m$  的潮流的比例系数;  $\alpha$  和  $\theta$  均为常数。

由式(9)可知,只需计算出  $D'_{k-h}$  和  $D'_{k-q}$  就可得到虚拟支路  $s$  对支路  $k$  的开断分布系数  $D_{k-s}$ 。参考式(1)可得:

$$D'_{k-h} = (D_{k-h} + D_{k-q} D_{q-h}) D_{hq} \quad (10)$$

$$D'_{k-q} = (D_{k-q} + D_{k-h} D_{h-q}) D_{hq} \quad (11)$$

$$D_{hq} = \frac{1}{1 - D_{h-q} D_{q-h}} \quad (12)$$

结合2.1节双支路开断虚拟模型中的式(6)可知,式(10)~式(12)中未知量仅为  $D_{h-q}$ 。其值可由支路  $q$  断开后的潮流虚拟折返过程推导得出<sup>[9]</sup>,如下所示:

$$\Delta P_{k-q} = \frac{D_{k-q} + D'_{k-m} D_{m-q} + D'_{k-n} D_{n-q}}{1 - A} P_q \quad (13)$$

$$\Delta P_{k-q} = D'_{k-q} P_q \quad (14)$$

式中,  $A = D_{m-q} D'_{q-m} + D_{n-q} D'_{q-n}$ 。

由式(13)、式(14)可得:

$$D_{h-q} = \frac{D'_{k-m} D_{m-q} + D'_{k-n} D_{n-q} + A D_{k-q}}{(1 - A) D_{k-h} + D_{q-h} (D_{k-q} + D'_{k-m} D_{m-q} + D'_{k-n} D_{n-q})} \quad (15)$$

将式(6)、式(10)、式(11)、式(15)代入到式(9)即可求出虚拟支路  $s$  对支路  $k$  的 VBDC。同时结合式(16)求得三支路同时断开后各支路的开断分布系数。

$$\Delta P_k = D''_{k-m} P_m + D''_{k-n} P_n + D''_{k-q} P_q \quad (16)$$

求得各支路开断分布系数计算式如下:

$$D''_{k-m} = (D'_{k-m} + D_{k-q} D'_{q-m}) D_{hq} \quad (17)$$

$$D''_{k-n} = (D'_{k-n} + D_{k-q} D'_{q-n}) D_{hq} \quad (18)$$

$$D''_{k-q} = \frac{D_{k-q} + D'_{k-m} D_{m-q} + D'_{k-n} D_{n-q}}{1 - A} \quad (19)$$

由上述推导过程并结合式(1)可知,各计算式

中涉及的开断分布系数均为单支路开断分布系数,因此在计算多支路同时断开时不必修改节点阻抗矩阵;同时由分析过程可知,三支路的分析方法同样也适用于更多支路同时断开的情形。

### 3 潮流越限风险指数

$FERI$  主要用于评判在支路断开后,其他各线路对转移潮流的敏感和脆弱程度。本节定义了线路潮流越限容量裕度并结合第 2 节中得到的开断分布系数,从而推导出各线路的  $FERI$ 。

#### 3.1 线路潮流越限容量裕度

结合各支路的初始潮流方向和开断分布系数的符号方向定义了线路潮流越限容量裕度。第 2 节中,针对线路不同开断的情况计算出了各情况下的 VBDC,因此在本节中,对于双支路开断的情况,取 2.1 节中的式(6)即  $D_{k-h}$  作为开断分布系数;对于三支路开断的情况,取 2.2 节中的式(9)即  $D_{k-s}$  作为开断分布系数,具体定义如下所示:

$$D_{k-X} < 0 \text{ 时:}$$

$$\text{delta\_}P = \begin{cases} |-P_{k_{\max}} - P_k| & P_k > 0 \\ |P_{k_{\max}} - P_k| & P_k < 0 \end{cases} \quad (20)$$

$$D_{k-X} > 0 \text{ 时:}$$

$$\text{delta\_}P = \begin{cases} |P_{k_{\max}} - P_k| & P_k > 0 \\ |-P_{k_{\max}} - P_k| & P_k < 0 \end{cases} \quad (21)$$

式中,  $X$  为开断线路,双支路断开时,  $X = h$ , 三支路断开时  $X = s$ ;  $k$  为所求的目标线路;  $P_{k_{\max}}$  为线路  $k$  的热稳定潮流极限;  $P_k$  为线路  $k$  的初始有功潮流;  $\text{delta\_}P$  为线路潮流越限容量裕度。

式(20)、式(21)的具体意义为,支路断开导致潮流增加时,潮流正向达到线路热稳定极限时所需的潮流转移增量;当支路断开导致潮流减小时,线路潮流反向并达到热稳定极限时所需的潮流转移增量。通过定义线路潮流越限容量裕度,在后续的计算中不必再单独考虑潮流转移中是否会导致其他线路发生潮流反向的问题,减少了不必要的计算。

#### 3.2 $FERI$ 的确定

$FERI$  的确定主要涉及到线路潮流越限容量裕度  $\text{delta\_}P$  和开断分布系数  $D_{k-X}$  以及开断线路的热稳定潮流  $P_{X_{\max}}$ ,其具体的定义如式(22)、式(23)所示:

$$FERI_{k-X} = \frac{\text{delta\_}P}{D_{k-X} P_{X_{\max}}} \quad (22)$$

$$P_{X_{\max}} = \sum_{X=i} P_{X_{\max}} \quad i \in M \quad (23)$$

式中,  $FERI_{k-X}$  为线路  $X$  断开时,受影响线路  $k$  的  $FERI$  数值大小;  $M$  为开断线路集合。对于在多支路断开情况下其他支路的开断分布系数  $D_{k-X}$ ,结合 2.1 节和 2.2 节分析过程和式(6)、式(9)可得:

$$D_{k-X} = \begin{cases} D_{k-m} & x = 1 \\ D_{k-h} & x = 2 \\ D_{k-s} & x = 3 \end{cases} \quad (24)$$

式中,  $x$  为断开支路的数量。

通过对式(22)的观察可知,  $FERI$  的数值越小,其接收转移潮流的能力越低,发生潮流越限的风险越高,属于敏感脆弱线路;且由  $FERI$  的推导过程可知,其值恒大于零。

### 4 输电断面快速识别

现有文献中已有大量关于输电断面识别方面的研究成果<sup>[17-21]</sup>。由于输电断面并没有给出明确的定义,因此,基于不同的考虑因素就会识别出不同的输电断面。文献[18]基于暂态稳定、热稳定和负荷侧热稳定三个安全主题下对输电断面进行识别,每个安全主题下所识别的潮流断面都不尽相同。在潮流转移输电断面的搜索方面,现有文献的研究大多集中在单支路断开方面,对多支路断开情况的研究较少。

针对多支路断开后的电力系统输电断面搜索问题,本文以虚拟支路为主导,将断开的多支路逐级等效为一条虚拟支路,并求得虚拟支路的 VBDC 和热稳定极限。搜索开断线路两端点之间的前  $K$  条路径,得到潮流转移区域,在潮流转移区域中利用各线路的  $FERI$  和相关特征搜索组成输电断面的相应线路。

#### 4.1 前 $K$ 条最短路径搜索

在高压输电网络中,线路的电抗值远大于其对应的阻抗值,因此,本文中前  $K$  条路径的搜索基于电抗加权邻接矩阵展开。当电网拓扑结构已知,由图论相关知识可知,可将电网抽象成一个图  $G(V, E)$ ,其中  $V$  表示电网中的母线集合,  $E$  表示母线之间的线路集合。得到电网的抽象图之后,运用图论相关的最短路径算法进行相关的路径搜索。

图论中发展较为成熟且能够运用到电力系统抽象图中的最短路径算法包括 Dijkstra 算法、Floyd 算法和 bellman-ford 算法等。Dijkstra 算法具有较小的时间复杂度  $O(N^2)$  且易于扩展;Floyd 算法时间复杂度和空间复杂度分别为  $O(N^3)$ 、 $O(N^2)$ ,其优点是可用于权值为负的线路的最短路径搜索;bellman-ford 算法时间复杂度为  $O(VE)$ ,也能够检测出图

中的负环。本文鉴于 Dijkstra 算法的易扩展性且图中不存在权值为负的支路,同时为满足快速计算的要求,采用基于 Dijkstra 算法的扩展算法<sup>[22]</sup>。

本文通过对电网进行抽象得到的图为  $G_0(V_0, E_0, W_0)$ , 其中  $W_0$  为图中各边的权值,即为电力系统中各线路的电抗值。基于 Dijkstra 算法改进的前  $K$  条路径的搜索算法流程图如图 3 所示,具体如下:

(1) 利用 Dijkstra 算法求得最短路径  $p_k, k=1$ , 令当前路径  $p=p_k$ 。

(2) 找出当前路径  $p$  中  $\beta$  大于 1 的第一个节点  $n_h$ , 若  $n_h$  的扩展节点  $n'_h$  不在节点集  $V$  中, 转步骤 (3), 否则找出路径  $p$  中  $n_h$  后面所有节点对应扩展节点不在  $V$  中的第一个节点, 记为  $n_i$  并转步骤 (4)。

(3) 为  $n_h$  构建扩展节点  $n'_h$  并添加到  $V$  中, 从  $n_h$  的前驱节点连接一条到  $n'_h$  的弧, 权重不变, 并添加到  $E$  中, 计算从开始节点到  $n'_h$  的最短路径, 记为  $n_i = n_h + 1$ 。

(4)  $p$  中  $n_i$  的后续节点记为  $n_j$ , 添加  $n_j$  到  $V$  中, 添加一条从  $n_j$  前驱节点到  $n_j$  的扩展节点  $n'_j$  的弧到集合  $E$  中, 弧的权值不变, 计算开始节点到  $n'_j$  的最短路径。

(5) 更新最短路径, 求开始节点到结束节点的扩展节点之间的最短路径作为第  $k$  条最短路径, 令  $k = k+1$ , 若  $k < K$ , 则转步骤 (2), 否则搜索结束。

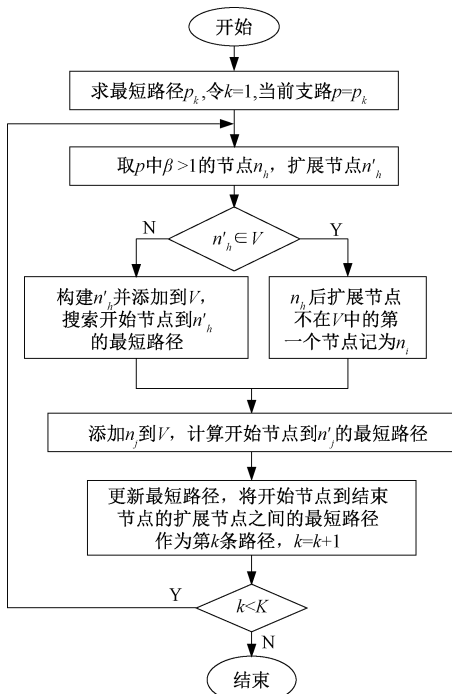


图 3 前  $K$  条路径搜索流程图

Fig.3 Top  $K$ -shortest path searching chart

基于已有文献对潮流转移路径的分析可知<sup>[19]</sup>, 线路断开时, 潮流主要转移到能够与开断线路组成闭环的最短路径中, 且前  $K$  条支路占据了大部分潮流,  $K$  值的选取原则满足式 (25) 的约束条件:

$$\begin{cases} K = \max \left( i \mid \frac{X_i}{X_1} \leq M \right) \\ K \leq S \end{cases} \quad (25)$$

式中,  $X_i$  为开断线路两端点之间的第  $i$  条最短路径长度;  $X_1$  为开断线路两端点之间的最短路径;  $M$  为路径长度之比的阈值;  $S$  为满足快速性需求而设置的路径选取数量上限。  $M$  和  $S$  的取值可根据具体情况进行调整<sup>[19]</sup>, 本文都取值为 2, 理由如下: 通过对潮流转移特性的分析可知, 若支路开断分布系数  $D$  越大, 则满足条件的最短路径数目  $K$  也将越小,  $M$  的值也越小, 可以近似认为  $M$  和  $D$  成反比关系。而在本文算例中组成输电断面的支路的开断分布系数均满足  $D \geq 0.6$ , 故取  $M = 1/D' - 1 = 2$ , 其中  $D'$  为  $D$  的中值 0.3, 减 1 是对式 (25) 第一条判据中小于等于号所做的调整。这样, 即使第  $K$  条路径与第  $K+1$  条路径没有任何支路交集时, 第  $K+1$  条路径上的电流也将小于等效电流的  $1/4$ 。同时为避免算法耗时较长, 本文算例中  $S$  的取值不超过 4。

#### 4.2 输电断面的快速确定

针对多支路断开情况, 本文提出一种快速搜索输电断面的算法, 算法主要包含构建潮流转移模型、潮流转移区域的搜索、区域内各支路相关指标的计算和组成输电断面支路的筛选, 具体过程如下:

(1) 搜索开断支路集合中每条断开支路两端节点之间的前  $K$  条线路。

(2) 若各前  $K$  条线路的支路集合中包含有其他开断线路, 则将开断线路从该支路集合中移除。

(3) 对所有开断线路前  $K$  条支路所包含的支路集取并集, 得到潮流转移支路集。

(4) 计算潮流转移支路集合中所有支路的  $FERI$ 。

(5) 筛选出  $FERI < 0.5$  的支路组成主要支路集合。

(6) 对主要支路集合中的线路, 若存在潮流反向并且支路潮流满足  $|P'_k| < |P_k|$ , 则将其从主要支路集合中移除 ( $P'_k$  为线路断开后的支路潮流,  $P_k$  为线路断开前的支路潮流)。

(7)最后得到的主要支路集合即为所求输电断面。

其对应的流程框图如图4所示。

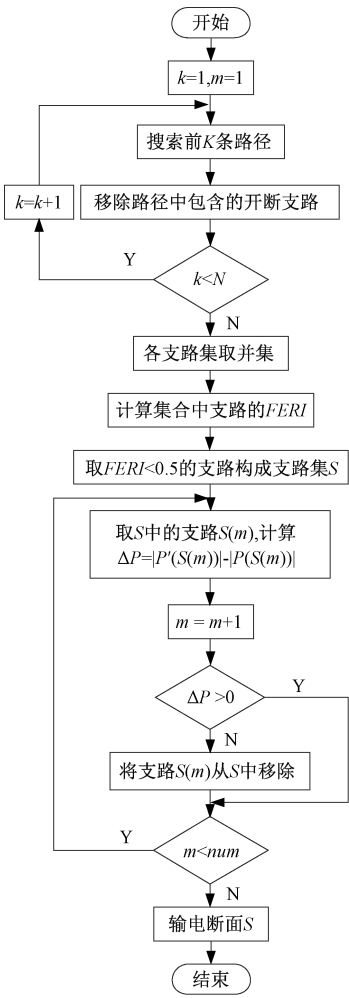


图4 输电断面搜索流程图

Fig.4 Transmission section searching chart

5 算例仿真

在 IEEE39 和 IEEE118 节点系统中进行多支路开断实验以对本文所提算法进行验证,IEEE39 节点系统的拓扑结构如图5所示。通过算例1和算例2分别进行双支路和三支路开断实验,通过 PSCAD 仿真软件得到线路开断前后网络中各目标支路的潮流大小,并在算例2中对2.2节所推导出的开断分布系数 $D''_{k-m}$ 、 $D''_{k-n}$ 、 $D''_{k-q}$ 计算公式的正确性进行验证。同时,在算例3中验证本文方法在较大规模电网中的适用性。由于式(9)中的 $\theta$ 和 $\alpha$ 都为常数,且不会影响后续过程中对潮流转移区域中支路的排序,因此,为方便计算, $\theta$ 和 $\alpha$ 都取值为1<sup>[9]</sup>。

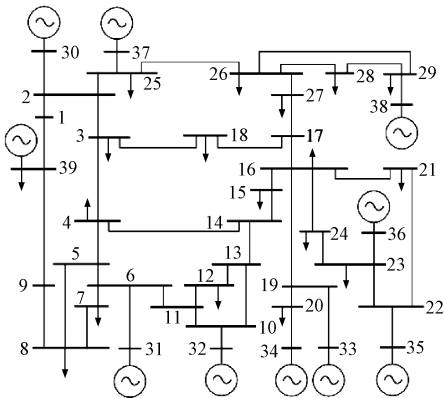


图5 IEEE39 节点系统  
Fig.5 IEEE39 node system

5.1 算例1

为方便对结果进行比较,本文采用与文献[9]相同的算例进行算法正确性的相关验证。首先进行双支路断开实验,断开支路分别为 $l_{14-4}$ 和 $l_{17-18}$ ,分别搜索两条支路的前K条路径,搜索结果如表1所示,路径中所包含的支路组成双支路断开时的潮流转移区域。潮流转移区域中各支路的相关仿真数据如表2所示。本文断面搜索结果与文献[9]结果对比如表3所示。图6为潮流转移区域中各支路在线路断开前后的负载率情况。

表1 双支路断开时前K条路径搜索结果		
Tab.1 Searching results of double branch		
开断线路	前K条最短路径	路径长度
14-4	4-5-6-11-10-13-14	0.042 3
	4-5-8-7-6-11-10-13-14	0.064 7
17-18	17-16-15-14-4-3-18	0.087 5
	17-27-26-25-2-3-18	0.101 3

表2中, $l_k$ 表示支路断开后的潮流转移支路集; $P'_k$ 表示线路断开后潮流转移支路集中各支路的有功潮流; $\Delta P_k$ 为支路的潮流增量, $\Delta P_k = P'_k - P_k$ ;FERI为支路的潮流越限风险指数。

表1中,通过搜索各条开断线路的前K条最短路径,由组成路径的各支路构成潮流转移区域,在潮流转移区域中计算并搜索组成输电断面的所有支路,提高了搜索效率。

表2中的数据为潮流转移区域中各支路的潮流仿真结果和相关数据指标,且已按照各支路的FERI值进行排序。由表2中的数据可知,组成潮流转移输电断面的线路,在支路断开之后,都具有较大的潮流变化量,更加容易受到开断线路的影响,从而使电网处于不稳定状态。

表 2 双支路断开相关支路仿真结果

Tab.2 Simulation result of double branch

支路序号	$l_k$	$P'_k/\text{MW}$	$\Delta P_k/\text{MW}$	$FERI$
1	$l_{6-11}$	-644.731 0	-306.527 5	0.036 4
2	$l_{2-3}$	510.037 8	176.607 6	0.091 9
3	$l_{10-11}$	619.849 9	278.952 9	0.121 6
4	$l_{2-25}$	-424.139 0	-162.355 2	0.207 6
5	$l_{4-5}$	-469.962 2	-292.275 1	0.255 2
6	$l_{5-6}$	-786.623 1	-271.868 2	0.399 3
7	$l_{3-18}$	158.000 0	200.685 1	0.434 1
8	$l_{13-14}$	-3.261 0	-306.527 5	0.623 0
9	$l_{17-27}$	187.639 0	162.355 2	0.682 9
10	$l_{10-13}$	30.150 1	-278.952 9	0.689 7
11	$l_{25-26}$	-108.139 0	-162.355 2	0.802 3
12	$l_{26-27}$	93.361 0	-162.355 2	1.104 9
13	$l_{16-17}$	187.639 0	-38.329 9	1.615 9
14	$l_{6-7}$	483.137 9	34.659 4	1.910 1
15	$l_{14-15}$	-3.261 0	-38.329 9	2.830 2
16	$l_{3-4}$	30.037 8	-24.077 5	3.502 5
17	$l_{7-8}$	249.337 9	34.659 4	3.554 8
18	$l_{15-16}$	-323.261 0	-38.329 9	4.865 7
19	$l_{5-8}$	316.660 9	-20.407 0	12.629 5

表 3 输电断面的搜索结果对比  
Tab.3 Comparison of searching results

本文方法		文献[9]方法	
6-11	2-3	6-11	2-3
4-5	2-25	4-5	2-25
10-11	3-18	10-11	18-3
5-6		5-6	17-27

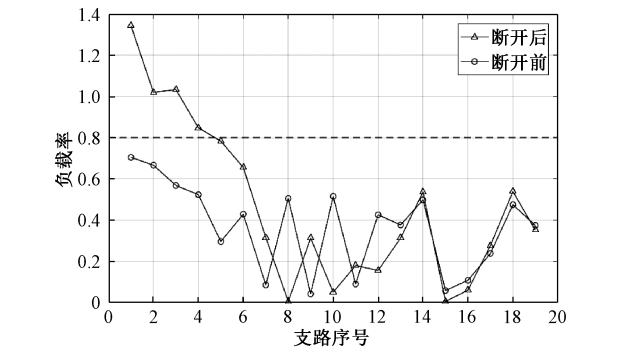


图 6 双支路开断前后各支路的负载率  
Fig.6 Load rate of branches before and after double removal

由表 3 的断面搜索结果对比可知,文献[9]的算法识别的输电断面相较于本文算法多包含了支路  $l_{17-27}$ 。由表 2 和图 6 中的数据可得,双支路断开之后,线路  $l_{17-27}$  的潮流增量仅为 162.35MW 且线路的

负载率也保持在一个较低的水平( $<0.4$ )。在图 6 中,虽然支路  $l_{3-18}$  的负载率较低,但在潮流转移过程中其支路潮流反向增大且  $FERI<0.5$ ,其对转移潮流更加敏感,故其属于构成输电断面的支路。

通过对输电断面的搜索结果对比可知,本文所提方法在保证结果正确的情况下,不会多选其他线路。并且,在计算量方面,双支路断开时,本文方法所界定的潮流转移区域包含 19 条支路,少于文献[9]中的 21 条支路和文献[12]中的全网 46 条支路,同时在支路断开后的开断分布系数计算采用的是基于电网的初始节点阻抗矩阵,不必在电网拓扑结构改变后重新生成节点阻抗矩阵计算支路开断分布系数,因此在计算速度方面有较大提升。

5.2 算例 2

在算例 1 双支路的基础上,再选取支路  $l_{5-8}$  构成三支路同时断开事故模型。此部分的断面搜索过程同算例 1,计算过程的相关变量及参数如 2.2 节中所表述。相关支路的仿真参数结果如表 4 所示。最终断面搜索结果以及对计算推导得到的三支路断开时各支路开断分布系数  $D''_{k-m}$ 、 $D''_{k-n}$ 、 $D''_{k-q}$  的正确性验证如表 5 所示。潮流转移区域中各支路在线路开断前后的负载率变化情况如图 7 所示。

表 4 三支路断开相关支路仿真结果  
Tab.4 Simulation result of triple branch

支路序号	$l_k$	$P'_k/\text{MW}$	$\Delta P_k/\text{MW}$	$FERI$
1	$l_{6-11}$	-641.502 4	-303.316 9	0.062 7
2	$l_{10-11}$	616.928 1	276.031 0	0.125 9
3	$l_{2-3}$	485.505 9	152.075 8	0.146 9
4	$l_{4-5}$	-494.523 6	-316.836 5	0.178 7
5	$l_{6-7}$	772.026 8	323.548 3	0.187 1
6	$l_{2-25}$	-427.379 1	-165.595 4	0.192 9
7	$l_{7-8}$	538.226 8	323.548 3	0.280 4
8	$l_{3-18}$	158.029 5	200.714 6	0.362 6
9	$l_{13-14}$	-0.050 4	-303.316 9	0.399 4
10	$l_{10-13}$	33.071 9	-276.031 0	0.441 7
11	$l_{17-27}$	190.879 1	165.595 4	0.465 4
12	$l_{25-26}$	-111.379 1	-165.595 4	0.529 8
13	$l_{26-27}$	90.120 9	-165.595 4	0.693 0
14	$l_{15-16}$	-320.050 4	-35.119 2	1.203 5
15	$l_{3-4}$	5.476 4	-48.638 8	1.528 1
16	$l_{14-15}$	-0.050 4	-35.119 2	2.425 9
17	$l_{16-17}$	190.849 6	-35.119 2	3.155 1
18	$l_{5-6}$	-494.523 6	20.231 4	11.358 8

表 5 输电断面搜索结果及相关验证  
Tab.5 Searching result and verification

断面支路	计算潮流/MW	仿真潮流/MW	误差率(%)
$l_{6-11}$	-641.502 4	-635.506 4	0.94
$l_{10-11}$	616.928 1	612.915 4	-0.65
$l_{2-3}$	485.505 9	487.489 0	1.43
$l_{4-5}$	-494.523 6	-495.511 0	0.20
$l_{6-7}$	772.026 8	778.025 4	0.77
$l_{2-25}$	-427.379 1	-424.363 6	0.71
$l_{7-8}$	538.226 8	533.225 4	-0.94
$l_{3-18}$	158.029 5	161.031 1	1.86
$l_{17-27}$	190.879 1	189.863 3	-0.54

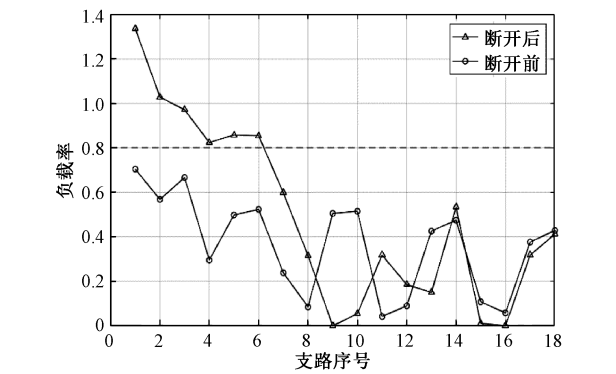


图 7 三支路断开前后各支路负载率

Tab.7 Load rate of branches before and after triple removal

由表 5 知,三支路同时断开时,本文方法搜索所得的输电断面与文献[9]的结果相同,进一步表明本文所提算法的正确性;同时,通过对推导所得的开断分布系数计算得到的支路潮流与仿真软件所得支路潮流进行对比分析,验证了 2.2 节中式(17)~式(19)的正确性,证明了所建立虚拟模型的有效性。

由图 7 可知,组成输电断面的支路中,支路  $l_{7-8}$  和支路  $l_{3-18}$  的负载率都较低,由表 4 中的仿真结果可知,在 *FERI* 都满足设定条件的情况下,支路  $l_{7-8}$  的潮流增量较大且支路  $l_{3-18}$  为潮流反向增大的支路,所以其都为输电断面的组成支路。

本文算法计算量分析如下:本文算法主要有三部分:建立潮流转移模型、潮流转移区域搜索、各支路 *FERI* 的计算。潮流转移模型中主要为单支路断开的开断分布系数的相关计算,在多支路断开时,只需计算各断开的支路的单支路开断分布系数,避免了传统方法由于要重新构造阻抗矩阵带来的大量计算;潮流转移区域搜索中主要涉及基于 Dijkstra 算法的路径搜索,相较于文献[9,12]中的 BFS 算法确定潮流转移区域进一步减少了计算量;而 *FERI* 的

计算仅为简单的数值计算。本文所有仿真均在处理器主频 1.8 GHz、8G 内存的计算机上进行,本文所提方法与文献[9]和文献[12]中方法所消耗的时间结果对比如表 6 所示。

表 6 各方法耗时对比

Tab.6 Time-consuming comparison of methods

(单位:s)			
	本文方法	文献[9]	文献[12]
算例 1	0.243	0.326	0.411
算例 2	0.260	0.402	-

表 6 中,文献[9]耗时较长的主要原因为:在多条支路断开之后,其将断开支路中的潮流按每条进行单独计算,而当潮流转移区域中所包含的支路较多时,将会耗费更多的时间;对于潮流转移区域的确定,其采用基于 BFS 的方式且相关阈值设定取经验值,而在 BFS 搜索过程中,阈值取值稍微增大,将会导致搜索过程所耗时间明显增加。文献[12]要遍历全网并计算所有支路的有功潮流转移分布系数和交流潮流变化量,通过设定相关阈值进行筛选得到输电断面,因为要计算全网中所有支路相关参数,故耗费时间较长。

5.3 算例 3

本节算例在 IEEE118 节点系统中验证本文所提方法在较大规模电网中的适用性。断开线路的选取由于要避免造成电网发生解列,因此在本算例中断开的双支路和三支路分别选取为支路  $l_{4-11}$ 、 $l_{23-24}$  和支路  $l_{4-11}$ 、 $l_{12-16}$ 、 $l_{23-24}$ 。本文方法所消耗时间见表 7。

表 7 本文方法所耗时间

Tab.7 Time-consuming comparison of methods

(单位:s)		
	双支路	三支路
本文方法	0.322	0.347

由表 7 可知,在 IEEE118 节点系统中,本文方法所耗时间并无明显大幅增加,主要是因为本文方法所确定潮流转移区域过程主要涉及最短路径搜索过程,受电网规模的影响较 BFS 搜索过程简单;且在后续潮流转移区域中支路相关指标计算方面也仅涉及到简单的数值计算。因此,本文所提方法可适用于大规模电网。

6 结论

本文提出了一种基于虚拟支路模型的多支路同时断开条件下潮流转移输电断面搜索的新算法。

对于多支路断开的情况,建立虚拟支路模型将其等效为一条支路,通过虚拟开断分布系数定义 *FERI*,构成输电断面组成支路判定的重要依据;同时,通过虚拟支路模型快速计算出支路断开之后其他各支路的开断分布系数,不必在每次拓扑结构改变后对电力网络的节点阻抗矩阵进行重新计算,大大节省了计算时间。

通过对潮流转移特性的分析,通过搜索开断线路前  $K$  条路径的方式确定潮流转移区域,搜索方式较为简洁有效,相较于文献[9,12]中使用 BFS 算法搜索潮流转移区域,本文方法所确定的潮流转移区域中所包含的支路更少,有效减少了后续计算和筛选判别的工作量。

仿真结果的对比分析表明,本文所提算法在断面搜索结果与其他文献方法相同的情况下,计算效率更高且耗费的时间更短,对于快速识别潮流转移输电断面具有重要意义。因此,本文所提算法在正确性方面和效率方面都具有一定的优越性。

本文所提方法解决了多支路同时断开之后的输电断面快速搜索问题,在接下来的研究中将致力于解决发生潮流转移后线路和断面的过载消除等问题,从而使电网更加稳定安全。

## 参考文献 (References):

- [1] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等 (Zeng Hui, Sun Feng, Li Tie, et al.). 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示 (Analysis of “9·28” blackout in South Australia and its enlightenment to China) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power System), 2017, 41 (13): 1-6.
- [2] 刘云 (Liu Yun). 巴西“9.13”远西北电网解列及停电事故分析及启示 (Analysis on and inspiration of the “9.13” islanding and outage of Brazilian remote northwest power grid) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2018, 38 (11): 3204-3213.
- [3] 任建文, 魏俊姣 (Ren Jianwen, Wei Junjiao). 电力系统脆弱线路的识别及其输电断面搜索 (Vulnerable line identification and its transmission section search for power system) [J]. 电力自动化设备 (Electric Power Automation Equipment), 2015, 35 (7): 37-42.
- [4] 常学佳 (Chang Xuejia). 电力系统关键断面的快速识别与输电极限分析 (Fast identification and transmission limit analysis of key section of power system) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2017.
- [5] 王文媛, 李卫国, 程宇頔, 等 (Wang Wenyuan, Li Weiguo, Cheng Yudi, et al.). 基于关键支路的关键断面确定方法 (Method for determining critical section based on critical branch) [J]. 华北电力大学学报 (Journal of North China Electric Power University), 2018, 45 (2): 54-63.
- [6] 程临燕, 张保会, 郝治国, 等 (Cheng Linyan, Zhang Baohui, Hao Zhiguo, et al.). 基于线路功率组成的关键输电断面快速搜索 (Fast search for key transmission section based on power component of line) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30 (10): 50-56.
- [7] 林济铿, 杨添凯, 胡世俊, 等 (Lin Jikeng, Yang Tiankai, Hu Shijun, et al.). 基于模糊聚类 and 最短路径的关键输电断面确定新方法 (A new fast search method of key power flow transfer section based on random fuzziness clustering algorithm and shortest path algorithm) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (5): 134-141.
- [8] 杨燕, 文福拴, 王洁, 等 (Yang Yan, Wen Fushuan, Wang Jie, et al.). 计及关键支路的输电断面自动确定方法 (A method for automatic discovery of transmission section with critical branches taken into consideration) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2012, 36 (14): 6-10.
- [9] 任建文, 何培成, 李刚 (Ren Jianwen, He Peicheng, Li Gang). 基于虚拟支路模型与 FTIL 的多支路开断潮流转移搜索新算法 (A new searching algorithm of power transferring for multi-branch removal event based on virtual-branch model and FTIL) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2017, 41 (1): 194-200.
- [10] 徐岩, 郅静 (Xu Yan, Zhi Jing). 多支路同时断开时潮流转移危险线路快速搜索 (Fast search of dangerous lines in power flow transferring resulting from simultaneous multi-branch removal) [J]. 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the CSU-EPSC), 2017, 29 (4): 36-42.
- [11] 高翔, 庄侃沁, 孙勇 (Gao Xiang, Zhuang Kanqin, Sun Yong). 西欧电网“11.4”大停电事故的启示 (Lessons and enlightenment from blackout occurred in ucte grid on November 4, 2006) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2007, 31 (1): 25-31.
- [12] 刘献超, 任建文, 渠卫东 (Liu Xianchao, Ren Jianwen, Qu Weidong). 基于广度优先法的多支路连锁切除潮流转移快速搜索算法 (A fast search algorithm of power flow transfer for multi-branches removal event based on breadth first search) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2015, 39 (13): 69-74.
- [13] 王杉, 谢利理, 王海宇, 等 (Wang Shan, Xie Lili,

- Wang Haiyu, et al.). MMC-HVDC 简化有限集快速模型预测控制研究 (Study of control strategy for MMC-HVDC system based on simplified finite set fast model predictive control) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2019, 38 (6): 16-26.
- [14] 张纯江,吕道正,董杰,等 (Zhang Chunjiang, Lv Daozheng, Dong Jie, et al.). 微电网中功率管理与潮流控制方法 (Power management and power flow control method in microgrid) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (6): 65-72.
- [15] 张伯明,陈寿孙,严正 (Zhang Boming, Chen Shousun, Yan Zheng). 高等电力网络分析 (Higher power network analysis) [M]. 北京:清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 2007.
- [16] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等 (Xu Huiming, Bi Tianshu, Huang Shaofeng, et al.). 计及暂态过程的多支路切除潮流转移识别算法研究 (Flow transferring identification algorithm for multi-branches removal event with consideration of transient phenomena) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2007, 27 (16): 24-30.
- [17] 赵峰,孙宏斌,张伯明 (Zhao Feng, Sun Hongbin, Zhang Boming). 基于电气分区的输电断面及其自动发现 (Electrical zone division based automatic discovery of flowgates) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2011, 35 (5): 42-46, 81.
- [18] 赵峰,孙宏斌,谭嫣,等 (Zhao Feng, Sun Hongbin, Tan Yan, et al.). 综合考虑多种电网安全主题的关键断面自动发现方法 (Automatic discovery method of power system critical flow gates considering multiple security themes in power grid) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 2014, 38 (5): 1169-1174.
- [19] 苗世洪,马帅,尚亚男,等 (Miao Shihong, Ma Shuai, Shang Yanan, et al.). 基于割点和路径搜索的输电断面快速识别方法 (A fast recognition method of transmission section based on cut-vertex and path search) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2014, 38 (2): 39-45.
- [20] 王增平,李刚,任建文 (Wang Zengping, Li Gang, Ren Jianwen). 基于前 K 最短路径的输电断面搜索新算法 (A new search algorithm for transmission section based on K shortest paths) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2012, 27 (4): 193-201.
- [21] 徐岩,鄧静 (Xu Yan, Zhi Jing). 基于关键线路的输电断面识别 (Identification of transmission section based on key lines) [J]. 华北电力大学学报 (Journal of North China Electric Power University), 2016, 43 (1): 21-26.
- [22] 王峰,游志胜,曼丽春,等 (Wang Feng, You Zhisheng, Man Lichun, et al.). Dijkstra 及基于 Dijkstra 的前 N 条最短路径算法在智能交通系统中的应用 (Application of Dijkstra and Dijkstra based N-shortest paths algorithm to intelligent transportation systems) [J]. 计算机应用研究 (Application Research of Computers), 2006, 23 (9): 203-205, 208.

## Fast search of transmission section in power flow transferring resulting from simultaneous multi-branch removal

CHENG Ruo-fa, FU Xin

(School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, China)

**Abstract:** To the power flow transfer problem caused by multi-branch disconnection, a new algorithm for searching transmission section based on virtual branch model and flow exceeding risk index is proposed when multi-branch is disconnected at the same time. Based on the disconnection of the double branch a virtual model of power flow transfer is established when multiple branches are disconnected. When the double branches are disconnected, it is considered as equivalent to a virtual branch, and the virtual breaking distribution coefficient of the virtual branch is derived by the virtual trend reentry process of the active power flow. When multiple branches are disconnected, on the basis of the disconnection of the double branch, the virtual branch and the third branch are made to form a new double branch model and then the virtual breaking distribution coefficient of the next generation virtual branch is derived. The virtual breaking distribution coefficient defines the evaluation index of flow exceeding risk index and the index is used to sort each branch in the power flow transfer area, thus obtaining the branches constituting the transmission section. The validity of the proposed algorithm is verified in the IEEE39 node system.

**Key words:** virtual breaking distribution coefficient; flow exceeding risk index; transmission section; power flow transfer area; virtual trend reentry