

基于网络分割及旁侧路径搜索的输电断面识别方法

和敬涵,王紫琪,张大海

(北京交通大学 电气工程学院 电力系统保护与控制实验室,北京 100044)

摘要: 在潮流转移特性分析的基础上,提出一种基于网络分割及旁侧路径搜索的输电断面识别方法。该方法立足图论思想构建电网拓扑模型及关系矩阵,利用网络分割简化系统结构,准确限定开断支路的输电断面存在范围;基于提出的删除添加算法建立旁侧通路路径库,获得各支路分流系数,据此识别输电断面并得到其敏感度排序。仿真结果证明所提方法的正确性与有效性。

关键词: 输电断面;网络分割;旁侧通路路径;图论;潮流转移因子;分流系数;割点;割边

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.07.001

0 引言

对国际上多起大停电事故的研究表明:线路切除所产生的连锁过载跳闸是造成停电范围扩大甚至系统崩溃的重要原因^[1-4]。实际上,潮流转移引发的线路过载最初只在局部发生,并且以切除支路为中心向外逐渐减弱^[5]。即在事故发展初期,发生连锁跳闸的支路往往与开断支路电气联系紧密^[6]。准确定位相关输电断面,并判断其跳闸风险,可实现大规模电力系统降维监控,缩短分析时间,保证后续一系列紧急控制措施的有效进行^[7-8]。

目前已有专家学者对上述输电断面识别问题进行了深入研究,主要方法可以归纳为以下 2 类。

(1)通过聚类方法获得与过载支路电源(负荷)区相同、功率组成相似、电气联系紧密的并行输电断面^[9-12];文献[9-10]分别将输电线路介数和潮流熵作为输电断面的辨识指标,通过差离平方和、模糊聚类等方法揭示系统的薄弱环节;文献[11]分析各支路注入的吸收功率组成结构,基于潮流追踪算法把与过载支路功率组成相似度较高的线路确定为输电断面;文献[12]利用线路功率传输分布因子进行断面识别。该类方法具有比较高的辨识率,但处理过程复杂、应用难度较大。

(2)基于潮流转移路径特性,利用网络图论思想进行输电断面搜索,该类方法在大规模电网中具有快速分析的效果,应用性较强^[13-16];文献[13]基于邻接矩阵快速识别输电断面,其矩阵的构造及计算方法为网络拓扑邻接关系的快速辨识问题提供了一定的解决思路;文献[14]考虑始末节点电气距离大小,仅将最短路径上的支路作为输电断面,可能造成其他路径中关键输电断面的遗漏;文献[15-16]分别采

用背离路径法、改进 Dijkstra 算法搜索前 k 条最短路径来识别输电断面,以克服只在最短路径上寻找输电断面所产生的支路漏选问题,但在复杂网络中输电断面多选及遗漏问题矛盾突出, k 值选取较为困难。

本文在图论思想的基础上进行深入研究,提出一种基于网络分割及旁侧路径搜索的输电断面识别方法。通过能达矩阵运算法则进行网络分割,获得开断支路所在关联块,以此限定输电断面存在范围,实现大电网的规模简化;利用提出的删除添加算法确定连接始末节点的所有旁侧通路路径,有效避免路径的遗漏;将传统 k 条路径选取问题转化为支路的优化选取,依据支路分流系数识别输电断面,同时得到断面敏感度排序。新英格兰 10 机 39 节点系统的仿真结果验证了本文所提方法的正确性和有效性。

1 输电断面特性分析

输电断面为一组输电线路的集合,该集合中的回路在过载支路开断后最有可能遭受大范围潮流转移的威胁。由文献[13-16]中的定义可知,输电断面为电网的最小割集,且构成断面的支路联系紧密,彼此间的开断灵敏度较大。在实际电力系统中,某条线路被切除导致的潮流转移现象发生在该线路所连接两点间的其他通路路径中,且主要通过电气距离较短的路径传播。本文以单条支路切除为例,对线路潮流变化特征进行分析。

对于大规模电网而言,单条支路的切除对全网整体阻抗和功率吸收的影响有限。假定支路 e 开断前后各发电机功率和系统负荷不变,则支路切除引起的旁侧通路潮流转移,可看作是支路 e 上的激励源 I_e (与故障前支路 e 的电流大小相等、方向相反)在无源网络中产生的响应^[17]。潮流转移电流特性见图 1。

本文在预想事故情况下进行输电断面特性分

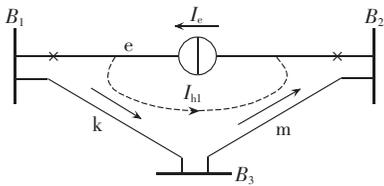


图 1 潮流转移电流特性

Fig.1 Current characteristic of power-flow transfer

析,在误差允许范围之内,采用支路电抗代替支路阻抗。假设电流源两端电压为 U_e ,网络中经由电流源的回路数为 n 。参考文献[18]列写如下回路电流方程:

$$\begin{cases} X_{11}I_{h1}+X_{12}I_{h2}+X_{13}I_{h3}+\cdots+X_{1n}I_{hn}=U_e \\ X_{21}I_{h1}+X_{22}I_{h2}+X_{23}I_{h3}+\cdots+X_{2n}I_{hn}=U_e \\ \vdots \\ X_{n1}I_{h1}+X_{n2}I_{h2}+X_{n3}I_{h3}+\cdots+X_{nn}I_{hn}=U_e \end{cases} \quad (1)$$

其中, $I_{hi}(i=1,2,\dots,n)$ 为各回路电流; $X_{ii}(i=1,2,\dots,n)$ 为回路 i 的自电抗; $X_{ij}(i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,n; i \neq j)$ 为回路 i 与 j 之间的互电抗。由基尔霍夫电流定律可得:

$$\sum_{i=1}^n I_{hi} = I_e \quad (2)$$

由式(1)、(2)及电路原理可知,在网络参数确定的情况下,单一电流源等值网络中各支路转移电流的大小只与电流源电流值相关,为电流源电流值的固定比例,且比例值越大表明支路潮流变化越明显。该比例因子可以衡量各支路受潮流转移的影响程度,具有简单明确的理论及工程意义,文献[15-18]均直接将其作为约束指标进行输电断面识别。本文在此特性的基础上,避开繁琐的数学计算,以图论搜索方法确定输电断面。

2 输电断面识别方法

本文提出的输电断面识别方法包含拓扑网络建立、网络分割、旁侧通路路径库建立及支路分流系数计算 4 个环节。

2.1 拓扑网络建立及简化

图论的基本思想在于将复杂网络抽象为节点、边的集合,建立直观拓扑连接示意图,并利用矩阵描述节点与节点、节点与边之间的连接关系。采用图论方法可将电网结构抽象为拓扑图 $G(V,E)$,其中 $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$ 为 n 个网络节点的集合, $E=\{e_1,e_2,\dots,e_m\}$ 为 m 条网络线路的集合。

图 $G(V,E)$ 中节点集合 V 的连接关系可用邻接矩阵 A 表示。 A 中元素可表示为:

$$A[i,j]=\begin{cases} 1 & v_i,v_j \text{ 通过 } E \text{ 中元素直接相连} \\ 0 & v_i,v_j \text{ 不直接相连} \end{cases}$$

对于 n 节点拓扑结构图而言,邻接矩阵 A 为一个 $n \times n$ 阶对称布尔矩阵,该矩阵可清晰描述不同节

点之间的电气连接关系。

在图 G 中,若删除顶点 v 后, G 由全连通图变成 2 个或多个连通块,则称顶点 v 为割点。同理,删除支路 e 后,图 G 由全连通图变为 2 个连通块,则称支路 e 为割边^[19]。图 2 中节点 v_3,v_4,v_8 为割点,线路 e 为割边。

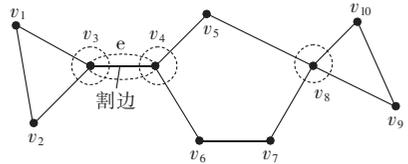


图 2 割点与割边示意图

Fig.2 Schematic diagram of cut edge and cut points

由割点与割边定义可得以下性质:任何一条输电断面与断开支路构成的回路无法跨越割点而存在;图中任一割边无旁侧通路。文献[6]和文献[19]均直接利用上述性质进行有效的网络切分。简单网络中的割点和割边可直接得出。对于无法直观获得割点和割边的复杂网络而言,可采用本文提出的识别方法简单快速地识别出割点与割边,其流程如图 3 所示。

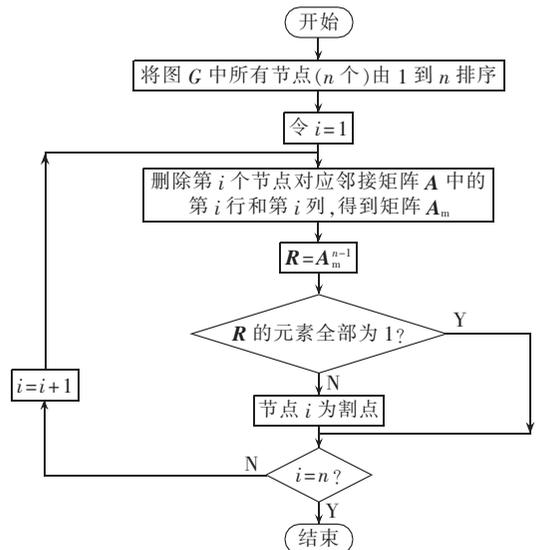


图 3 割点识别流程图

Fig.3 Flowchart of cut point identification

图 3 中 R 为能达矩阵, R 中元素 $r_{ij}=1$ 表示节点 i 可经 1 条或多条支路到达节点 j , $r_{ij}=0$ 表示从节点 i 没有路径可以到达节点 j 。当 R 的元素不全为 1 时,网络中存在独立节点或独立网络,可判断该节点为割点。

割边识别过程与割点类似,删除某条支路时,将邻接矩阵中该支路所在位置元素置 0。将识别出的割点、割边作为分界点和分界边进行网络拆分,以获得多个独立系统,图 2 所示网络的分割结果如图 4 所示。

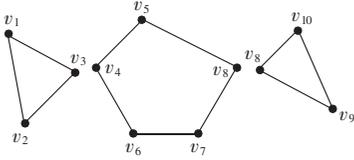


图 4 网络分割结果

Fig.4 Result of network segmenting

上述过程可将输电断面区域从整个大电网限定至局部网络,以实现电力系统的降维与简化。

2.2 旁侧通路路径库建立及输电断面识别

在上述简化过程的基础上,本文提出了删除添加算法,以获得旁侧通路路径库,进一步获得支路分流系数,从而可以有效识别输电断面。识别过程的详细阐述如下。

在图 G 中,设 d 为 v_i 和 v_j 之间的一条路径,且该路径的长度为 $l(d)$ 。由 v_i 和 v_j 之间所有互不相同的路径组成路径集合 $D(G, v_i, v_j)$,即 $D(G, v_i, v_j) = \{d \mid d \text{ 为 } G \text{ 中 } v_i, v_j \text{ 之间的路径}\}$ 。定义线路 e 的旁侧通路路径集合为 $D(G', p, q)$,且 $e \notin D(G', p, q)$, G' 为网络分割后线路 e 所在的关联块, p, q 分别为线路连接的始、末节点。将线路电抗作为边的权值,集合 $D(G', p, q)$ 中路径长度值 $l(d)$ 为路径 d 上所有边的权值之和。

由文献[20]中结论可知,若 $d \in D(G', p, q)$,则存在 $G_1 \subseteq G'$,使 $d = d_{\text{shortest}}(G_1, p, q)$, d_{shortest} 为两点间的最短路径, G_1 为图 G 删除若干条(包含 0 条)边后的子图。即图 $G'(V', E')$ 中两顶点间的任一路径都必然是它的某一子图 $G_1(V', E_1)$ 中相同顶点之间的最短路径。因此,可将图 $G'(V', E')$ 中两顶点间的非最短路径转换为子图中的最短路径加以求解。本文基于上述结论提出一种删除添加算法用以搜索旁侧通路输电断面集合。以搜索线路 e 的旁侧通路路径集合 $D(G', p, q)$ 为例,设图 $G'(V', E')$ 的节点数为 N ,边数为 M ,图 G' 不包含支路 e ,令 p 为始点, q 为终点,具体过程如下。

(1) 删除图 G' 中的 a 条互不相同的边 ($a=1, 2, \dots, M$),与图 G' 一起构成 G' 的全部子图 G_1, G_2, \dots, G_x ,子图数目 x 如式(3)所示,并删除与 p, q 无连接路径的子图。

$$x = 1 + C_M^1 + C_M^2 + C_M^3 + \dots + C_M^M \quad (3)$$

(2) 选取子图 $G_b (b=1, 2, \dots, x)$ 进行最短路径查询。 $G_b(V_b, E_b)$ 中节点数为 g ,边数为 f ,构建 $g \times g$ 阶矩阵 C_{USTb} 用于存放任意两顶点间的当前距离,即 $C_{\text{USTb}}[i, j]$ 为当前搜索到的 v_i 到 v_j 的最短路径长度。构建 $g \times g$ 阶矩阵 P_{Rb} ,用于存放各节点最短路径的后继节点,即 $P_{\text{Rb}}[i, j]$ 为 v_i 到 v_j 当前最短路径中 v_i 的后一节点。 $C_{\text{USTb}}, P_{\text{Rb}}$ 构建过程如下。

a. 取走图 G_b 中所有边 E_b ,并对其进行排序。令

$k=1$,初始化矩阵 C_{USTb} 和 P_{Rb} 。当图 G_b 中不包含任何边时, C_{USTb} 中仅对角线元素的值为 0,其余元素全部为无穷大,如式(4)所示; P_{Rb} 中除对角线外其余位置元素全部为 ϕ ,表示当前无路径,如式(5)所示。

$$C_{\text{USTb}} = \begin{bmatrix} 0 & \infty & \dots & \infty \\ \infty & 0 & \dots & \infty \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \infty & \infty & \dots & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$P_{\text{Rb}} = \begin{bmatrix} v_1 & \phi & \dots & \phi \\ \phi & v_2 & \dots & \phi \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \phi & \phi & \dots & v_g \end{bmatrix} \quad (5)$$

b. 加入 E_b 中第 k 条边 e_k , e_k 连接两节点 u 和 v , $u, v \in V_b$,并进行判断:若 $C_{\text{USTb}}[u, v]$ 及 $C_{\text{USTb}}[v, u]$ 的数值小于 $l(e_k)$,则直接执行步骤 **d**,否则令 $C_{\text{USTb}}[u, v] = C_{\text{USTb}}[v, u] = l(e_k)$,并执行步骤 **c**。

c. 对 $C_{\text{USTb}}, P_{\text{Rb}}$ 进行如下松弛处理。对于 $w (1 \leq w \leq g)$,若 $C_{\text{USTb}}[u, w] > C_{\text{USTb}}[u, v] + C_{\text{USTb}}[v, w]$,则将 $C_{\text{USTb}}[u, w]$ 和 $C_{\text{USTb}}[w, u]$ 的数值更改为 $C_{\text{USTb}}[u, v] + C_{\text{USTb}}[v, w]$,将 $P_{\text{Rb}}[u, w]$ 的域值改为 v ;如果 $C_{\text{USTb}}[u, w] = C_{\text{USTb}}[u, v] + C_{\text{USTb}}[v, w]$,则向 $P_{\text{Rb}}[u, w]$ 域值中插入 v ;若 $C_{\text{USTb}}[v, w] < C_{\text{USTb}}[u, v] + C_{\text{USTb}}[v, w]$,则不做处理。同理,对于 $w (1 \leq w \leq g)$,若 $C_{\text{USTb}}[v, w] > C_{\text{USTb}}[v, u] + C_{\text{USTb}}[u, w]$,则将 $C_{\text{USTb}}[v, w]$ 和 $C_{\text{USTb}}[w, v]$ 的数值更改为 $C_{\text{USTb}}[v, u] + C_{\text{USTb}}[u, w]$,将 $P_{\text{Rb}}[v, w]$ 的域值更改为 u ;若 $C_{\text{USTb}}[v, w] = C_{\text{USTb}}[v, u] + C_{\text{USTb}}[u, w]$,则向 $P_{\text{Rb}}[v, w]$ 的域值中插入 u ;若 $C_{\text{USTb}}[v, w] < C_{\text{USTb}}[v, u] + C_{\text{USTb}}[u, w]$,则不做处理。

d. 令 $k = k + 1$,如果 $k = f$,执行步骤 **e**;否则返回步骤 **b**。

e. 由 $C_{\text{USTb}}[p, q]$ 可得到 p 到 q 的最短路径权值,通过对 P_{Rb} 数组中存储单元的遍历,可直接获取始末节点间的所有最短路径。

(3) 采用步骤(2)中过程处理子图 G_1, G_2, \dots, G_x ,获得各子图最短路径及路径长度。将所有路径放入旁侧通路路径库,并对路径库中的路径进行整理:删除重复路径;当路径途经节点过多时,路径分流小,且节点对支路分流的影响较大,可能造成一定误差,故删除不满足式(6)所示约束条件的路径。

$$N_p \leq T \quad (6)$$

其中, N_p 为路径的节点数; T 为节点限值,一般取值为 15^[18]。

(4) 经上述处理后可得支路 e 的所有旁侧通路路径,设旁侧通路路径共 y 条。路径长度分别为 $l(1), l(2), \dots, l(y)$ 。由电路原理可知,路径长度与路径分流系数成反比,则归一化后路径 $h (h=1, 2, \dots, y)$ 的分流系数 ψ_h 为:

$$\psi_h = \frac{1}{l(h)} \sum_{s=1}^v \frac{1}{l(s)} \quad (7)$$

其中, $l(h)$ 为路径 h 的路径长度。支路 e_i 的分流系数为:

$$\varphi_{e_i} = \sum_{h \in \mu} \psi_h \quad (8)$$

其中, φ_{e_i} 为支路 e_i 的分流系数; μ 为通过支路 e_i 的旁侧通路路径集。当支路的初始潮流方向与通路方向一致时, 则 ψ_h 为正值; 否则 ψ_h 为负值。对支路分流系数进行排序, 判断支路分流系数是否满足式(9)。若式(9)成立, 则该支路受潮流转移的影响较大, 可判定为输电断面, 否则该支路受潮流转移影响较小可忽略。

$$\varphi_{e_i} \geq \varphi_{th} \quad (9)$$

其中, φ_{th} 为断面限制系数。上述输电断面识别方法不仅可以筛选出并行输电线路中承担功率较大的断面集合, 还可对输电断面进行敏感度排序, 准确获得各支路受潮流转移的影响程度。

3 仿真结果与分析

以新英格兰 10 机 39 节点系统为例, 说明所提输电断面识别方法的有效性。依据图论思想将复杂网络抽象成拓扑结构有向图 $G(V, E)$, 如图 5 所示, 并建立相应的邻接矩阵及关联矩阵。

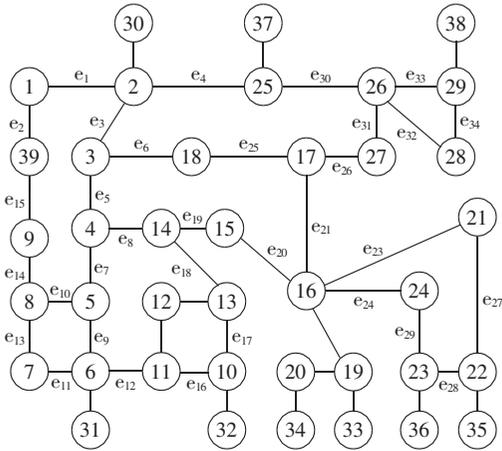


图 5 10 机 39 节点系统拓扑结构图
Fig.5 Topological structure of 10-machine 39-bus system

通过线路悬挂节点收缩可以获得简化之后的搜索系统。简化过程消除了 11 个节点、11 条支路。矩阵 A 的阶数降为 28 阶。识别图中割点为节点 16、26, 以此为分界点进行网络分割, 分割结果如图 6 所示。

在上述基础上, 采用本文所提方法进行输电断面识别, 并利用仿真软件 PSASP 进行结果校验。线路权值取为线路电抗值。

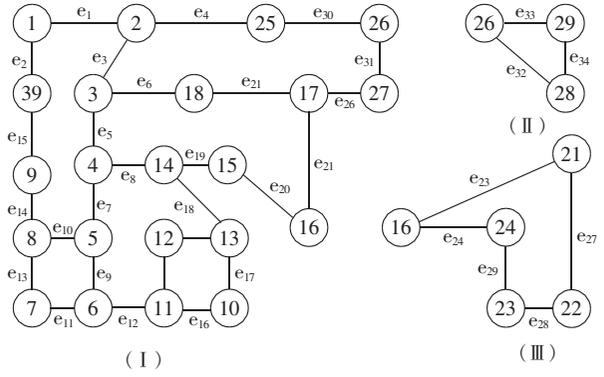


图 6 简化后的系统拓扑结构图
Fig.6 Simplified topological structure of 10-machine 39-bus system

(1) 线路 e_{33} 输电断面。

取出 e_{33} 所在关联块 II, 并获得不包含线路 e_{33} 且始、末节点 29、26 连通的唯一子图, 如图 7 所示。

该子图结构简单, 可直接获得各支路分流系数。为了说明本文所提方法的有效性, 在此对处理过程进行详细阐释。提取图 7 中所有边 e_{34} 、 e_{32} , 并初始化矩阵 C_{USTII} 和 P_{RII} 。初始化结果为:

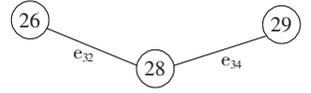


图 7 e_{33} 关联块拓扑结构图
Fig.7 Topological structure of e_{33} -related block

$$C_{USTII} = \begin{matrix} & 26 & 28 & 29 \\ 26 & \begin{bmatrix} 0 & \infty & \infty \\ \infty & 0 & \infty \\ \infty & \infty & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$P_{RII} = \begin{matrix} & 26 & 28 & 29 \\ 26 & \begin{bmatrix} 26 & \phi & \phi \\ \phi & 28 & \phi \\ \phi & \phi & 29 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

加入线路 e_{34} , 线路权值 $l(e_{34})$ 为 0.015 1, 小于 $C_{USTII}[28, 29]$ 以及 $C_{USTII}[29, 28]$ 。则令 $C_{USTII}[28, 29] = C_{USTII}[29, 28] = 0.015 1$, 对 C_{USTII} 、 P_{RII} 中各元素进行松弛处理后的结果为:

$$C_{USTII} = \begin{matrix} & 26 & 28 & 29 \\ 26 & \begin{bmatrix} 0 & \infty & \infty \\ \infty & 0 & 0.015 1 \\ 0 & 0.015 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$P_{RII} = \begin{matrix} & 26 & 28 & 29 \\ 26 & \begin{bmatrix} 26 & \phi & \phi \\ \phi & 28 & 29 \\ \phi & 28 & 29 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

同理加入线路 e_{32} , 松弛处理后得到 C_{USTII} 、 P_{RII} 为:

$$C_{USTII} = \begin{matrix} & 26 & 28 & 29 \\ 26 & \begin{bmatrix} 0 & 0.0474 & 0.0625 \\ 0.0474 & 0 & 0.015 1 \\ 0.0625 & 0.015 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$P_{Rll} = \begin{matrix} & 26 & 28 & 29 \\ \begin{matrix} 26 \\ 28 \\ 29 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 26 & 28 & 28 \\ 26 & 28 & 29 \\ 28 & 28 & 29 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

由 $C_{USTH}[29,26]$ 可得支路 e_{33} 的旁侧通路路径长度权值为 0.0625。遍历矩阵 P_{Rll} , 由 $P_{Rll}[29,26]$ 处的数值得到路径节点连接顺序为 29-28, 进一步由 $P_{Rll}[28,26]$ 得到最终路径为 29-28-26。经 2.2 节中的步骤(4)判断得到输电断面为 e_{32} 、 e_{34} 。线路 e_{33} 输电断面搜索过程中, 时间复杂度为 $O(fg^2)=O(18)$ 。其中, f 为子图边数, $f=2$; g 为子图节点数目, $g=3$ 。计算过程具有较好的时效性。

在 50 ms 时刻切除线路 e_{33} , 将搜索结果与仿真结果进行对比, 如表 1 所示。

表 1 线路 e_{33} 输电断面搜索结果
Table 1 Results of transmission section searching for line- e_{33}

输电断面图论搜索结果	所属区域	仿真结果	
		潮流转移前 线路电流/kA	潮流转移后 线路电流/kA
e_{32}	II	0.7821	1.8269
e_{34}	II	1.9184	3.0141

由仿真结果可看出, 输电断面上潮流转移前后电流增幅较大, 而非关联区域、非输电断面上电流显著小于识别断面上的电流。

(2) 线路 e_{20} 输电断面。

基于文献[12]的脆弱性评估结果对最脆弱线路 e_{20} 输电断面进行搜索。取出 e_{20} 所在关联块 I, 并获得不包含线路 e_{20} 且始、末节点 16、15 连通的所有子图。搜索各子图的最短路径, 获得连接始末节点的所有旁侧通路, 经筛选后, 满足节点要求的无重复旁侧通路路径如表 2 所示。

表 2 线路 e_{20} 旁侧通路路径
Table 2 Side-paths of line- e_{20}

路径	路径节点	沿途线路	路径权值
L_1	16-17-18-3-4-14-15	e_{21} 、 e_{25} 、 e_6 、 e_5 、 e_8 、 e_{19}	0.0863
L_2	16-17-27-26-25-2-3-4-14-15	e_{21} 、 e_{26} 、 e_{31} 、 e_{30} 、 e_4 、 e_3 、 e_5 、 e_8 、 e_{19}	0.1528
L_3	16-17-27-26-25-2-1-39-9-8-5-4-14-15	e_{21} 、 e_{26} 、 e_{31} 、 e_{30} 、 e_4 、 e_1 、 e_2 、 e_{15} 、 e_{14} 、 e_{10} 、 e_7 、 e_8 、 e_{19}	0.2315
L_4	16-17-18-3-2-1-39-9-8-5-4-14-15	e_{21} 、 e_{25} 、 e_6 、 e_3 、 e_1 、 e_2 、 e_{15} 、 e_{14} 、 e_{10} 、 e_7 、 e_8 、 e_{19}	0.1952
L_5	16-17-18-3-2-1-39-9-8-7-6-5-4-14-15	e_{21} 、 e_{25} 、 e_6 、 e_3 、 e_1 、 e_2 、 e_{15} 、 e_{14} 、 e_{11} 、 e_9 、 e_7 、 e_8 、 e_{19}	0.2004
L_6	16-17-18-3-4-5-6-11-10-13-14-15	e_{21} 、 e_{25} 、 e_6 、 e_5 、 e_7 、 e_9 、 e_{12} 、 e_{16} 、 e_{17} 、 e_{18} 、 e_{19}	0.1149
L_7	16-17-27-26-25-2-3-4-5-6-11-10-13-14-15	e_{21} 、 e_{26} 、 e_{31} 、 e_{30} 、 e_4 、 e_3 、 e_5 、 e_7 、 e_9 、 e_{12} 、 e_{16} 、 e_{17} 、 e_{18} 、 e_{19}	0.1814
L_8	16-17-18-3-4-5-8-7-6-11-10-13-14-15	e_{21} 、 e_{25} 、 e_6 、 e_5 、 e_7 、 e_{10} 、 e_{13} 、 e_{11} 、 e_{12} 、 e_{16}	0.1373

由 C_{UST} 存储数据获得路径权值。对权值取倒数, 并进行归一化处理, 可得各路径的分流系数为:

$\psi_1=0.21433$, $\psi_2=0.12105$, $\psi_3=0.07990$, $\psi_4=0.09476$, $\psi_5=0.09230$, $\psi_6=0.16098$, $\psi_7=0.10197$, $\psi_8=0.13472$ 。由式(8)可计算得到各支路分流系数, 令式(9)中断面限制系数 φ_{lh} 为 0.2, 选取满足要求的支路并将其排序。

在 20 ms 时刻切除线路 e_{20} , 将计算结果与仿真结果对比, 如表 3 所示。

表 3 线路 e_{20} 输电断面搜索结果
Table 3 Results of transmission section searching for line- e_{20}

输电断面搜索结果	计算结果		仿真数据 潮流转移电流 增加值/kA
	分流系数	系数排序	
e_{19}	1.00000	1	1.8094
e_{21}	1.00000	2	1.5676
e_{25}	0.73305	3	1.2690
e_6	0.73305	4	1.2676
e_5	0.73304	5	1.2622
e_{17}	0.39766	6	0.6019
e_{18}	0.39766	7	0.5951
e_4	0.30292	8	0.3313
e_{26}	0.30292	9	0.2408
e_1	0.26696	10	0.2392
e_2	0.26696	11	0.2392
e_{15}	0.26696	12	0.2177
e_{14}	0.26696	13	0.1913

由表 3 可知, 分流系数理论值排序与实际潮流转移增加值排序基本相同。分流系数相同的支路, 仿真数据差值由系统节点电压变化所引起。

算例中, 输电断面搜索结果可覆盖实际受影响较严重的输电线路, 且系数大小直接反映了各断面受潮流转移的影响程度。将本文所提方法与其他方法进行对比。采用文献[12]功率传输分布因子差异系数进行输电断面识别, 识别结果虽与本文断面限制系数 φ_{lh} 取 0.3 时完全相同, 但依据差异系数由小至大排序的结果为 e_{19} 、 e_{25} 、 e_5 、 e_6 、 e_{21} 、 e_{26} 、 e_4 、 e_{18} 、 e_{17} , 与文献[12]计算得到的有功增加因子及实际潮流变化量不能保持一致。采用文献[14]中方法进行输电断面搜索, 由于仅搜索最短路径来确定输电断面, 会漏选其余路径上的大量支路, 如 e_{17} 、 e_{18} 、 e_4 、 e_{26} 。采用文献[16]中 k 条支路搜索方法也将造成线路 e_{17} 、 e_{18} 的漏选, 且上述路径搜索类方法均无法对线路敏感度进行准确排序。

对本文所提输电断面识别方法的运算时间进行分析。对于含 m 条线路、 n 个节点的网络而言, 最坏情况下的总计算量为:

$$P = n^2 \sum_{k=1}^{m-1} C_m^k (m-k) \quad (10)$$

时间复杂度为 $O(P)$ 。与其余路径搜索方法[12-14]相比, 本文所提方法的计算量略有提升, 但所提方法可以有效保证路径搜索的全面性与系数排序的准确

性,具有实际工程意义。

4 结论

所提输电断面识别方法在电网模型降维、路径搜索和输电断面优化选取方面均做出了重要改进。其主要意义在于:(1) 利用能达矩阵运算搜索割点和割边,并据此进行网络分割,准确限定输电断面存在范围;(2) 融合潮流转移因子定义和图论路径搜索思想,改变传统 k 条路径选取方式,采用删除添加算法搜索所有连通路,在支路分流系数基础上准确识别输电断面,有效避免了路径的遗漏。仿真算例表明,所提方法既可以准确识别输电断面,又能得到各断面敏感度排序,在电力系统监控工作中具有实际参考价值。本文所提方法仅对网络拓扑关系与潮流转移特性进行分析,下一步的研究工作将包括输电元件物理参数及输电线路容量等因素的影响分析,以明确脆弱环节,维持电网安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 曾鸣,李红林,薛松,等. 系统安全背景下未来智能电网建设关键技术发展方向——印度大停电事故深层次原因分析及对中国电力工业的启示[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):175-181.
ZENG Ming,LI Honglin,XUE Song,et al. Key technologies of future smart grid construction based on power system security:a view of blackout in India and experience and enlightenment to power industry in China[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(25):175-181.
- [2] 李扬,苏慧玲. $N-k$ 故障下影响电力系统脆弱性的关键线路研究[J]. 电力自动化设备,2015,35(3):60-67.
LI Yang,SU Huiling. Critical line affecting power system vulnerability under $N-k$ contingency condition[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(3):60-67.
- [3] 王韶,刘冲铮,董光德,等. 基于复杂网络理论计及校正控制的电力系统连锁故障模型[J]. 电力自动化设备,2016,36(9):162-168.
WANG Shao,LIU Peizheng,DONG Guangde,et al. Power system cascading failure model based on complex network theory,with consideration of corrective control[J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(9):162-168.
- [4] 易俊,周孝信. 考虑系统频率特性以及保护隐藏故障的电网连锁故障模型[J]. 电力系统自动化,2006,30(14):1-5.
YI Jun,ZHOU Xiaoxin. Cascading failure model of power grids considering frequency response characteristics and hidden failures[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(14):1-5.
- [5] 吕歆瑶,李华强,郑国,等. 基于综合脆性关联度的连锁故障预测与冲击辨识[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):116-121,125.
LÜ Xinyao,LI Huaqiang,ZHENG Guo,et al. Cascading failure forecast and impact identification based on comprehensive brittleness relevance[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(12):116-121,125.
- [6] 梅生伟,何飞,张雪敏,等. 一种改进的 OPA 模型及大停电风险评估[J]. 电力系统自动化,2008,32(13):1-5,57.
MEI Shengwei,HE Fei,ZHANG Xuemin,et al. An improved OPA model and the evaluation of blackout risk[J]. Automation of Electric Power Systems,2008,32(13):1-5,57.
- [7] 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):42-46,81.
ZHAO Feng,SUN Hongbin,ZHANG Boming. Electrical zone division based automatic discovery of flowgates [J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(5):42-46,81.
- [8] 马明,刘强,沈凤杰,等. 输电设备过载与断面功率越限在线控制决策[J]. 电网与清洁能源,2015,31(6):26-32.
MA Ming,LIU Qiang,SHEN Fengjie,et al. On-line auxiliary decision-making for overload control of power transmission equipment and sections [J]. Power System and Clean Energy,2015,31(6):26-32.
- [9] 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.
- [10] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等. 基于潮流熵测度的连锁故障脆弱线路评估及其在四川主干电网中的应用[J]. 电力自动化设备,2013,33(10):40-46.
LI Yong,LIU Junyong,LIU Xiaoyu,et al. Vulnerability assessment based on power flow entropy for lines in cascading failures and its application in Sichuan backbone power grid[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(10):40-46.
- [11] 程临燕,张保会,郝治国. 基于线路功率组成的关键输电断面快速搜索[J]. 中国电机工程学报,2010,30(10):50-56.
CHENG Linyan,ZHANG Baohui,HAO Zhiguo. Fast search for key transmission section based on power component of line[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(10):50-56.
- [12] 任建文,魏俊姣. 电力系统脆弱线路的识别及其输电断面搜索[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):37-42.
REN Jianwen,WEI Junjiao. Vulnerable line identification and its transmission section search for power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):37-42.
- [13] 周德才,张保会,姚峰. 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. Fast search for transmission section based on graph theory[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(12):32-38.
- [14] 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,2009,36(4):11-15.
NI Hongkun,XU Yuqin. Fast search for the key transmission section based on dynamic-programming principle[J]. Journal of North China Electric Power University,2009,36(4):11-15.
- [15] 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.
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):121-127.
- [16] 苗世洪,马帅,高亚男,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.
MIAO Shihong,MA Shuai,SHANG Yanan,et al. A fast recognition method of transmission section based on cut-vertex and path search [J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(2):39-45.
- [17] 徐慧明,毕天姝,黄少锋,等. 基于潮流转移因子的广域后备保护方案[J]. 电网技术,2006,30(15):65-71.

- XU Huiming, BI Tianshu, HUANG Shaofeng, et al. A wide area backup protection scheme based on flow transferring relativity factor[J]. Power System Technology, 2006, 30(15):65-71.
- [18] 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.
- [19] 杨文辉, 毕天姝, 薛安成, 等. 潮流转移区域后备保护动作特性自适应调整策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18):1-6.
- YANG Wenhui, BI Tianshu, XUE Ancheng, et al. Adaptive strategy for back up protections within power transferring area against cascading trips[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18):1-6.
- [20] 柴登峰, 张登荣. 前 N 条最短路径问题的算法及应用[J]. 浙江

大学学报(工学版), 2002, 36(5):61-64.

CHAI Dengfeng, ZHANG Dengrong. Algorithm and its application to N shortest paths problem[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2002, 36(5):61-64.

作者简介:



和敬涵

和敬涵(1964—),女,北京人,教授,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:jhhe@bjtu.edu.cn);

王紫琪(1992—),女,河北保定人,博士研究生,主要研究方向为电力系统保护与控制(E-mail:14117390@bjtu.edu.cn);

张大海(1973—),男,山东菏泽人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统监控、电力系统电能质量分析(E-mail:dhzhang1@bjtu.edu.cn)。

Transmission section identification based on network segmenting and side-path searching

HE Jinghan, WANG Ziqi, ZHANG Dahai

(Power System Protection and Control Research Laboratory, School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: According to the characteristic analysis of power-flow transfer, a method of transmission section identification based on network segmenting and side-path searching is proposed, which constructs the network topology model and relation matrix based on the graph theory, simplifies the system structure by network segmenting, and limits accurately the existing area of transmission section for a line to be tripped off. A delete-add algorithm is proposed for setting the side-path library to obtain the flow coefficient of each path, based on which, the transmission sections are identified and ranked according to their sensitivities. Simulative results verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

Key words: transmission section; network segmenting; side paths; graph theory; power-flow transfer factor; flow coefficient; cut points; cut edges