

# 考虑热稳定极限下基于 受电区域的输电断面自动搜索方法研究

杨文武<sup>1</sup>, 王彪<sup>2</sup>, 王云丽<sup>2</sup>, 蒋帅<sup>1</sup>

(1. 西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049;

2. 国网四川省电力公司调度控制中心, 四川 成都 610047)

**摘要:** 电力系统实际运行通常以监控输电断面作为控制电网运行的重要措施, 输电断面一般也是电网的薄弱环节, 找出薄弱环节需要通过大量的人工计算分析, 并考虑热稳定、暂态功角稳定和暂态电压稳定等多方面约束, 费时费力。为提高分析效率, 通过对大量实际电网的薄弱环节特性分析, 提出了一种基于受电区域的电网输电断面的自动搜索方法, 约束仅考虑线路和主变压器的热稳定。根据实时潮流状态, 以重载线路和脆弱线路为基础, 利用受电区域的层次递进搜索策略及其停止原则, 获得供电区域和受电区域之间的联络线, 即初始断面, 最后根据初始断面的潮流方向以及支路开断分布系数来确定关键断面。算例表明了算法的实用性。

**关键词:** 受电区域; 供电区域; 安全裕度; 潮流转移比; 脆弱线路

**Abstract:** The monitoring of transmission sections are the important measures in actual operation of power grid, and transmission sections are also the weak points of power grid. Seeking for the weak points needs lots of manual calculation and analysis, and it needs consider thermal stability, transient angle stability, transient voltage stability and many other constraints, which is time-consuming. In order to improve the efficiency of the analysis, the characteristic analysis of the weak points for transmission sections is carried out, and the automatic search for transmission sections based on power-receiving partition is presented which only considers the thermal stability of line and main transformer. According to the state of real-time power flow, the search strategy and its stopping criterion based on the overload lines and fragile lines are used to obtain the tie lines between power supply region and power-receiving region, namely the initial transmission section. Finally, the key transmission section is determined by the power flow direction of the initial transmission section and breaking distribution coefficient. The examples show the practicability of the proposed algorithm.

**Key words:** power-receiving region; power supply region; safety margin; flow transferring ratio; fragile lines

中图分类号: TM732 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2016)04-0073-05

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2016.04.014

## 0 引言

传统的输电断面是由电网运行专家通过离线分析、人工选择而得, 但是由于人工计算的极限以及电网运行方式的日趋复杂, 既会浪费很多时间, 又不能满足大规模的实际电力系统的需要, 因此, 近年来越来越多的人关注到输电断面的自动识别。

目前, 有关输电断面的识别及自动搜索方法主要有: 1) 通过网络拓扑和电气联系的紧密程度, 将大规模复杂的网络划分为多个联系薄弱的子区间<sup>[1-8]</sup>, 而输电断面就是这些子区间之间的联络线。该方法虽然能够使复杂的网络极大地得到简化, 但是却无法对区间内的线路进行搜索, 即会漏掉区间

内的输电断面。2) 根据过载支路两端节点间的最短路径以及前 K 最短路径来找到受过载支路影响较为严重的线路组成输电断面<sup>[9-13]</sup>。该方法没有考虑潮流大小的影响, 而且求出来的输电断面是某几条回路串联起来的, 并不是实际电网调度中心所需要的监控对象, 难以用于工程实际。3) 划分电源区和负荷区。该方法根据同步相量测量单元和 WAMS 提供的广域电压相角信息<sup>[14]</sup>, 对电网中的母线群进行分群, 计算量大, 而且难于运用于工程实际。

所进行的研究适用于电网调度中心实际进行监控的输电断面, 综合上述方法 2) 和方法 3), 以重载支路和脆弱支路为基础, 利用图论相关知识, 并结合线路潮流的安全裕度, 求出电源区和负荷区, 则电源

区和负荷区间的联络线为初始断面,最后根据初始断面的潮流方向以及支路开断分布系数来确定最终的关键断面。

## 1 输电断面相关概念

### 1.1 输电断面

通过对运行专家给出的断面结果的研究和分析,断面的主要特征如下:

- 1) 断面是电网的一个割集;
- 2) 断面中当有一条线路断开时,其他线路的安全裕度应比较小;
- 3) 断面中的线路间的联系紧密,相互之间的开断分布系数比较大;
- 4) 断面中的线路有功潮流方向相同,允许少量线路有功潮流方向不同,但其潮流应该很小。

显然,初始断面中的线路只是对输电断面的初步识别,而要想确定最终的关键断面,必须还要满足特征3)和特征4)。所提方法将采用初始断面再到关键断面的逐步递进的输电断面自动发现方法。

### 1.2 线路安全裕度

线路安全裕度  $M$  的计算公式为

$$M = 1 - \frac{P}{P_m} \quad (1)$$

式中:  $P$  为线路传输的功率;  $P_m$  为线路的热稳定极限功率。

当电网正常运行时,通常线路的传输功率要小于其极限传输功率,  $M$  在  $0 \sim 1$  之间。但是,当断面中某条线路断开时,会引起与其紧密相连的其他线路有功潮流急剧增加,有可能超过线路的热稳定极限功率,此时  $M < 0$ 。

### 1.3 开断分布系数

电网中线路的开断分布系数计算公式为

$$P_j = P_{j0} + \lambda P_{i0} \quad (2)$$

式中: 设过载支路为  $L_i$ ,  $P_{i0}$  为支路  $L_i$  断开前的有功潮流;  $P_{j0}$  为支路  $L_j$  断开前线路  $L_j$  的有功潮流;  $P_j$  为支路  $L_i$  断开后线路  $L_j$  的有功潮流;  $\lambda$  为支路  $L_i$  断开引起线路  $L_j$  有功潮流增加占  $L_i$  断开前有功潮流的比值,即开断分布系数。显然,取值在  $-1 \sim 1$  之间。

开断分布系数  $\lambda$  表征了正常线路  $L_i$  断开后对线路  $L_j$  影响的严重程度,  $\lambda$  越大,表明转移到  $L_j$  线路的有功潮流越多,影响就越严重。因此,关键断面

就是要找到  $\lambda$  大于某个阈值的线路集合,即

$$\lambda > k \quad (3)$$

式中  $k$  值的选取受线路的热稳定极限功率以及潮流大小等因素的影响,这里取  $k = 0.2$ 。

## 2 输电断面的识别及自动发现

电力系统的运行工况由电源、负荷和网络结构来决定,因此区域间联系的强弱可以认为是由网络联系强弱和潮流交换大小两方面决定的。若两个区域间网架联系较弱,但同时潮流交换很小,则一般不会有安全稳定问题,需要监控的就是系统中网架联系较弱而潮流交换又很大的环节。

### 2.1 重载线路和脆弱线路的识别

目前电网静态安全运行是满足  $N - 1$  检验,严格的  $N - 1$  检验需要对全部线路进行  $N$  次断线分析,计算工作量很大。实际上,网络中有一些线路在开断后并不会引起系统过负荷。研究表明,大停电事故的发展和扩大阶段都与重载线路和脆弱线路息息相关<sup>[15]</sup>。

重载线路: 线路安全裕度小于某个阈值的线路。

脆弱线路: 线路边介数大于某个阈值的线路。

边介数<sup>[16-17]</sup>: 网络中任意发电机和负荷节点的最短路径所经过该边的总次数与网络中总最短路径数之比。

计及电网等效图的方向性,以线路的电抗作为线路的权重,求取线路  $L_i$  的线路边介数  $B_i$ 。具体算法步骤如下:

- 1) 将实际电网等效为有向图,线路的权重为该线路的电抗值;
- 2) 在 Warshall - floyd 算法的基础上,计算任意发电机和负荷节点之间的最短路径;
- 3) 统计通过网络中每条线路的最短路径数,求取每条线路的线路边介数。

线路边介数越大,说明经过该线路的供电路径数越多,线路介数的大小在一定程度上可以反映该线路在电网中的相对重要程度。因此,定义线路的脆弱性指标  $\lambda_i$  为

$$\lambda_i = B_i \quad (4)$$

兼顾输电系统网络拓扑结构和当前运行方式下的潮流分布的影响,符合输电网络功率传输的实际情况,更能够体现出电力系统电能传输的个性。  $M$

越小,线路的安全裕度越小; $\lambda_i$ 越大,线路的脆弱程度就越高,说明线路对输电网络的重要性就越大。无论是断开安全裕度越小的线路还是脆弱程度大的线路,都有可能对整个网络造成比较大的影响。

### 2.2 电网参数预处理

由于实际电网规模庞大,难以有效分析,需要根据其特征进行简化。实际电网通常有多个电压等级,在结构上包括多个厂站和负荷供电区域。每个厂站中包括多个电压等级和变压器,厂站中没有线路,实际电网的输电断面不可能出现在厂站中,因此厂站中所有节点可以合并为一个节点。为了研究简便,把每个发电厂和变电站的220 kV以上的母线挑选出来,并最终把相同发电厂和变电站的所有220 kV母线均命名为发电厂和变电站的名字。因此研究对象就是发电厂、变电站和线路,具体原则为:

1) 只考虑高压输电网(220 kV及以上),不考虑配电网和发电厂、变电站的主接线;

2) 合并同塔双回的输电线,不计及并联电容支路(消除自环和多重线路),使模型成为简单图。

经上述初步简化,电网图就成为有 $n$ 个节点和 $k$ 条线路的稀疏连通图,由无向邻接矩阵和有向邻接矩阵分别表示。

### 2.3 电网有向邻接矩阵

根据实时潮流方式将电力系统抽象成一个图,图是抽象支路和节点的集合,它反映图中所包含的各支路之间的联接关系<sup>[18-19]</sup>。图可表示为 $G(V, E)$ , $V$ 表示顶点集合, $E$ 表示边的集合。

设图中有 $n$ 个顶点,则邻接矩阵为 $n \times n$ 阶方阵 $(a_{ij})_{n \times n}$ ,当 $v_i$ 与 $v_j$ 之间存在一条由 $v_i$ 指向 $v_j$ 的有向边时,则 $a_{ij} = 1$ ,否则 $a_{ij} = 0$ 。当 $v_i$ 与 $v_j$ 之间存在一条有 $v_j$ 指向 $v_i$ 的有向边时,则 $a_{ji} = 1$ ,反之 $a_{ji} = 0$ 。

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \langle v_i, v_j \rangle \in E \\ 0, & \langle v_i, v_j \rangle \notin E \end{cases} \quad (5)$$

### 2.4 受电区域扩展

提出一种有效的受电区域扩展算法,通过该算法能够简便快捷地搜索出以脆弱支路为基础的受电区域和供电区域。该算法首先根据实际运行电网生成无向邻接矩阵,在重载支路或脆弱支路断开后生成电网的有向邻接矩阵。选择断开支路的受端节点为根节点,根节点处于生成树的第1层,然后利用无向邻接矩阵搜索出与根节点直接相连的第2层节点及相应的支路,最后逐层搜索,满足一定的搜索终止条件,最终生成一个完整的路径树。经过判断,将路

径树中满足条件的叶节点相连的支路称为初始断面。

#### 2.4.1 系统有向图

简化后的电网由发电厂、变电站和输电线路组成,将电网的支路抽象为图中的边,将母线抽象为图中的节点,线路中潮流的方向抽象为边的方向。图1为某简单系统按上述方法生成的有向图。

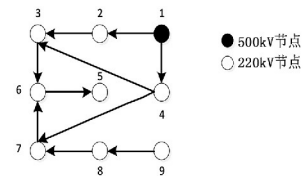


图1 简单系统有向图

#### 2.4.2 受电区域的生成

当系统某条支路开断后,因为受端节点接受的有功功率要保持不变,所以由于支路断开引起的潮流减少一定会从邻近的供电节点补充。所谓供电节点相当于电源区,在所提方法中分为3类:其一是500 kV节点;其二是坚强的220 kV节点,即此节点的出度为1,且只向断开支路的受端供电,入度 $\geq 2$ ,这样才能保证此节点供电可靠;其三是发电厂节点。

受电区域的扩展本质上属于各节点的逐层遍历过程。以所有重载支路的受端节点为根节点,逐一进行路径搜索,最终得到完整路径数的叶节点所连支路的集合。

以过载支路 $l_{2-3}$ 为例来展示完整路径树的生成,即受电区域的选取过程。选取该过载支路的受端节点为根节点,从无向邻接矩阵中找出与根节点相连的节点,判断去除过载支路的送端节点,并确定对应的支路,组成完整路径数的第2层;第2层的所有节点组成下一步操作的扩展节点集合,顺序对该集合中的节点找出对应的扩展支路和扩展节点,完成对完整路径数的第3层搜索;重复上述过程,直到满足搜索停止条件,结束搜索,生成完整的路径树,也即生成了以重载支路为基础的受电区域,如图2所示。

搜索停止条件: 1) 搜索到的节点为供电节点; 2) 搜索到的支路的安全裕度小于阈值,表示此处为薄弱环节; 3) 搜索到的节点的度为1,表示已经形成了割集。图2中箭头不表示实际潮流方向,只表示算法搜索的过程。节点1为500 kV节点,节点7为220 kV坚强供电节点,节点5的度为1,因此搜索到此处结束,生成完整的路径树,则受电区域就是节点3、节点4、节点5和节点6,供电区域就是节点1和节点7。

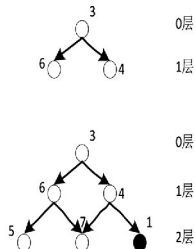


图2 受电区域的生成

### 2.5 初始断面的获取

初始断面的获取方法如下:对生成完整路径树的所有叶节点进行遍历,判断其是否是供电节点或其所连支路是否是薄弱环节,若满足条件,则记录叶节点所连的支路,这些支路和重载支路构成初始断面。具体原则如下,流程图如图3所示。

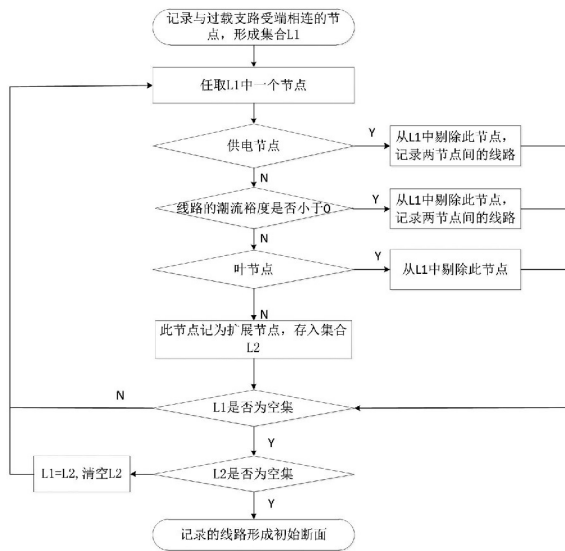


图3 单个初始断面生成流程图

1) 从重载线路  $L_{ij}$  的受端节点  $j$  向外搜索,判断  $L_{ij}$  开后与节点  $j$  相连的线路的有功潮流裕度是否小于线路安全裕度阈值(阈值可自己设定),若是,则停止在此方向的搜索,该线路作为初始断面中的一条线路;否则,继续向下一层搜索,直到没有与之相连的节点为止,即形成割集。

2) 若与受端节点  $j$  相连的节点为供电节点,则停止搜索,该线路作为初始断面中的一条线路。

3) 若与受端节点  $j$  相连的线路潮流方向由节点  $p$  流向节点  $j$ ,而且线路潮流裕度  $> 60\%$ ,此时节点  $p$  作为考察节点,若节点  $p$  的入度  $\geq 2$ ,出度等于 1,则节点称为坚强供电节点,则停止此方向的搜索,该线路作为初始断面中的一条线路。

4) 在规则 3) 的前提下,由节点  $p$  再向外扩展一层,若与  $p$  相连的节点中有断开线路  $L_{ij}$  的供端节点  $i$ ,且潮流方向由供端  $i$  节点流向节点  $p$ ,则将规则 3)

中的线路移出初始断面,将节点  $i$  与节点  $p$  之间的线路作为初始断面中的线路。

在搜寻过程中,若从不同方向搜索到同一节点,这说明该节点在受电区域内,此时舍弃其中一条路径。

### 2.6 关键断面的识别

统计出重载线路跳闸后初始断面中潮流方向相同的线路,将有功潮流方向不同的线路剔出初始断面;分别计算初始断面中所有线路在过载线路跳闸后的开断分布系数,当某条线路的开断分布系数大于阈值,即  $\lambda > k$  时,将其选入关键输电断面。

## 3 算例分析

为了验证所提算法的有效性,以某实际电网某高峰负荷时期为研究对象,进行分析计算。该电网共有 158 条 220 kV 以上输电线路,116 台变压器,所研究时期是丰水期。该电网部分电力系统接线图如图 4 所示。

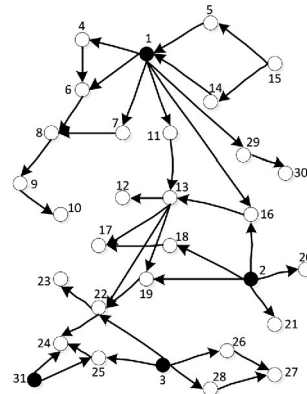


图4 某实际电网接线图

取  $k = 0.2$ ,以同塔双回  $l_{2-19}$  为例来具体搜索关键输电断面,其完整路径树如图 5 所示,节点为 13、3、23 和 31,其中节点 23 的度为 1,形成了割集;节点 31 和节点 3 为 500 kV 供电节点;节点 13 相邻的支路安全裕度低于阈值,属于薄弱环节。依据上述规定,以  $l_{2-19}$  为断开支路的初始断面包括  $l_{13-19}$ 、 $l_{13-22}$ 、 $l_{24-31}$ 、 $l_{25-31}$  和  $l_{3-25}$ 。

选取关键断面,分别计算初始断面中的潮流转移比,经过计算,只有  $l_{13-19}$  的潮流转移比  $\lambda > 0.2$ ,所以求出的关键输电断面为  $l_{2-19} + l_{13-19}$ 。

表 1 分别列出所提方法求得的部分输电断面。仿真表明,所求的关键输电断面几乎覆盖了绝大多数实际受影响比较严重的输电断面,而且可以找出一些运行方式专家没有给出的关键输电断面,这个结论与对广泛大停电事故的分析结果是一致的。

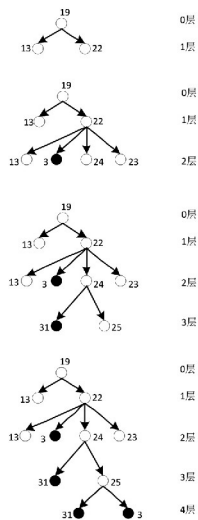


图 5 路径生成树  
表 1 仿真结果

开断支路	初始断面	关键断面
$l_{1-6}$	$l_{4-6} + l_{1-7}$	$l_{1-6} + l_{4-6} + l_{1-7}$
$l_{6-8}$	$l_{7-8}$	$l_{6-8} + l_{7-8}$
$l_{19-22}$	$l_{3-22} + l_{24-25} + l_{24-31}$	$l_{19-22} + l_{3-22}$
$l_{2-19}$	$l_{13-19} + l_{3-22} + l_{24-31} + l_{3-25}$	$l_{2-19} + l_{13-19}$
$l_{2-16}$	$l_{1-11} + l_{1-16} + l_{2-18} + l_{2-19} + l_{13-19}$	$l_{2-16} + l_{2-19}$
$l_{13-19}$	$l_{2-19} + l_{19-22}$	$l_{13-19} + l_{2-19}$

## 4 结 语

通过对过载支路开断后潮流转移特征的分析以及实际运行中电网调度人员对输电断面需求分析,提出了以过载支路为基础,综合考虑潮流大小、线路热稳定极限等因素的影响,识别出电力系统的电源区和负荷区,并最终根据潮流方向和线路潮流安全裕度找到适用于调度运行人员需要的关键输电断面。所提方法不仅能够在离线状态下仿真求出复杂网络的关键输电断面,大大减少了人工计算和分析的时间,而且具有在线应用的前景。整个算法基于精确的潮流计算,将系统安全分析的范围缩小到关键输电断面,从而大大减弱了分析的复杂程度,有利于电网连锁故障的预防。

### 参考文献

[1] 周德才,张保会,等.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.  
[2] 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.  
[3] 雷成,刘俊勇,刘友波,等.基于状态分区的输电断面

快速搜索[J].华东电力,2013,41(3):558-561.  
[4] 任建文,魏俊姣.基于GN分区的输电断面快速搜索[J].现代电力,2015,32(3):42-48.  
[5] 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.  
[6] 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.  
[7] 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.  
[8] 肖雅元,张磊,罗毅,等.基于回路可靠性贡献指标的电网薄弱点分析[J].电力系统保护与控制,2015,43(15):54-59.  
[9] 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.  
[10] 王增平,李刚,任建文,等.基于前K最短路径的输电断面搜索新方法[J].电工技术学报,2012,27(4):193-201.  
[11] 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.  
[12] 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].电路系统保护与控制,2015,43(12):8-13.  
[13] 杨文辉,毕天姝,薛安成,等.基于图论的潮流转移路径的快速搜索[J].电网技术,2012,36(4):84-88.  
[14] 杨文辉,毕天姝,马强,等.基于广域电压相角信息的输电断面快速识别方法[J].电力系统保护与控制,2013,41(24):58-63.  
[15] 陈晓刚,孙可,曹一家.基于复杂网络理论的大电网结构脆弱性分析[J].电工技术学报,2007,22(10):138-144.  
[16] 张国华,张建华,杨京燕,等.基于有向权重图和复杂网络理论的大型电力系统脆弱性评估[J].电力自动化设备,2009,29(4):21-26.  
[17] 蔡泽祥,王星华,任晓娜.复杂网络理论及其在电力系统中的应用研究综述[J].电网技术,2012,36(11):114-121.  
[18] 王海英,黄强,李传涛,等.图论算法及其MATLAB实现[M].北京:北京航空航天大学出版社,2010.  
[19] 卢开澄.图论及其应用[M].北京:清华大学出版社,1995.

### 作者简介:

杨文武(1992) 硕士,主要从事电力系统运行与控制;  
王彪(1985) 高级工程师,研究方向为电力系统紧急控制。

(收稿日期:2016-03-08)