

## 基于子网络收缩的输电断面搜索方法

侯俊贤<sup>1</sup>, 韩民晓<sup>1</sup>, 董毅峰<sup>2</sup>, 王毅<sup>2</sup>, 卜广全<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学, 北京 102206; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192)

**摘要:** 输电断面的强弱对整个电网的安全稳定性具有重要的影响。离线计算分析中主要采用人工分析的方式, 而在线稳定评估系统应用中则需要能够自动识别系统的输电断面, 以自动适应电网运行方式的变化。从实际电网输电断面的特点出发, 针对高电压等级非电磁环网断面和电磁环网断面, 提出了基于子网络自动收缩的输电断面搜索方法。首先, 将整个网络按照厂站和供电区域进行简化。其次, 以合并子网络所有送出线路为起点, 关联子网络自动收缩, 在所有功率送出线路中搜索高电压等级非电磁环网断面。以供电区域中的合并厂站功率送出高电压等级线路为起点, 关联厂站自动收缩, 在所有高电压等级功率送出线路中搜索电磁环网高电压等级线路。最后, 采用华北-华中电网实际系统算例验证了方法的有效性。输电断面自动搜索是电力系统安全稳定状态在线自动分析的重要基础, 具有重要的实际应用价值。

**关键词:** 输电断面; 电磁环网; 断面搜索; 在线稳定评估; 电力系统

### Transmission section searching method based on power system sub-network combination

HOU Junxian<sup>1</sup>, HAN Minxiao<sup>1</sup>, DONG Yifeng<sup>2</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>, BU Guangquan<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The stability of transmission section has great influence on whole power system stability. In offline simulation, the transmission section analysis is mainly analyzed by person. However, it should be analyzed automatically in order to suitable for power system network change when used in online stability assessment. Based on the characteristic of actual power system, the paper presents a transmission section automatic identification method based on sub-network combination, and the types of transmission line include high voltage electromagnetic loop section and non-electromagnetic loop section. Firstly, the whole power network is simplified according to substation and power supply area; then, starting from one subnet and considering one or more subnets automatic combination, the high voltage non electromagnetic loop sections are found from all the power out lines of one or more subnet; starting from one high voltage substation of power supply area and considering one or more substation automatic combination, the high voltage lines of electromagnetic loop sections are found from all the power out lines of one or more substation. Finally, the north China and central China interconnected power system is used to verify the validity of the method. The transmission section searching is an important basis of online power system stability assessment and has great practical application value.

**Key words:** transmission section; electromagnetic loop; section searching; online stability assessment; power system

中图分类号: TM74

文献标识码: A

文章编号: 1674-3415(2015)12-0092-06

## 0 引言

我国电网多个地区电网之间实现互联, 形成大的互联电网, 不同负荷中心之间互联的联络线也构成输电通道。这些输电通道对整个电网的安全稳定性具有决定性的影响, 是保持整个系统安全稳定运行的关键。因此, 在电力系统研究分析过程中都将

断面作为重要的关注目标进行研究分析<sup>[1-3]</sup>。

日常的离线计算分析中, 电网数据是确定的, 通过对电网的物理结构、发电和负荷分布, 通过人工分析的方式基本能够确定主要的联络线, 通过大量的仿真计算能够确定比较关键的输电通道, 分析整个系统的安全稳定状态。在线稳定评估系统的开发和建设已经在我国实际系统中获得较好的推广应

用<sup>[4-8]</sup>, 在线过程中, 由于系统的计算分析过程自动完成, 人不能直接参与系统的计算分析过程, 因此需要能够自动进行系统的分析和判断。输电断面作为系统关键因素, 在线系统中需要首先能够自动识别系统存在的输电断面, 为后续进行深入分析研究、确定关键断面奠定基础。

近年来, 如果寻找输电断面国内外文献中已经提出了一些方法, 主要包括基于电气分区的方法<sup>[9]</sup>、基于最短路径的方法<sup>[10]</sup>、图论方法<sup>[11]</sup>、基于线路功率的方法<sup>[12-13]</sup>、基于背离路径的方法<sup>[14]</sup>等、基于广域电压相角信息的识别方法<sup>[15]</sup>、考虑地理分区的方法<sup>[16]</sup>等。所有这些方法主要基于实际电网中输电断面的如下特点: 输电断面是一个完整的割集、输电断面线路通常有较大的电气距离、输电断面所有线路功率方向基本一致、输电断面线路断开后本断面其他线路功率变化较大等, 都具有一定的应用价值。

本文结合实际系统的特点, 从实际电网的特点出发, 提出了基于子网络收缩的输电断面自动搜索方法, 包括电磁环网断面和非电磁环网断面, 并采用实际的华北-华中互联电网算例对方法进行了验证。

## 1 输电断面的定义和类型

断面从理论上是网络中的最小割集, 对于实际电网而言, 输电断面是不同地区之间的传输线路的集合, 主要用于功率传输以达到发电负荷平衡的目的。因此, 输电断面可以定义为满足割集条件的不同地区之间传输功率的线路的集合。

实际电网中存在大量的输电断面, 输电断面可以采用不同方式进行分类, 一种常用的分类方式是依据同一输电通道中的电压等级是否相同进行分类, 包括多个不同电压等级的断面是电磁环网断面, 仅包括一个电压等级的断面是非电磁环网断面。

我国大规模互联电网中, 非电磁环网断面主要关注的是 500 kV 及以上电压等级构成的输电断面, 本文介绍的方法也主要从这种类型断面特点出发的, 因此后面统称为高电压等级断面。高电压等级断面有不同的形式, 例如电源外送断面、大区域之间的联络线、省间联络线、省内部不同地区之间的联络线, 是电网中最受关注的部分, 对电网的安全网稳定性有重要的影响。

电磁环网断面除了有高电压等级线路之外, 通常还有低电压等级线路, 结构相对复杂<sup>[17-20]</sup>。电磁环网断面可能承担不同地区之间的功率传输任务, 或者承担向负荷区域供电的任务。电磁环网断面一般出现在供电区域内部、不同地区之间, 在高电压

等级线路出现的初期也可能存在电磁环网的情况。电磁环网断面因高电压等级线路断开后对低电压等级线路可能造成冲击而受到关注。

两种类型断面关注的主要问题和特点都有所差异, 因此需要根据其自身特点进行分析。

## 2 高电压等级输电断面的快速搜索方法

我国电网是 500 kV 电压等级为主的网络结构, 不同区域、省间存在大量的高电压等级输电断面。图 1 是一个实际电网的接线图, 其中颜色较深的线路是 500 kV 电压等级线路, 其他线路为 220 kV 及以下电压等级。

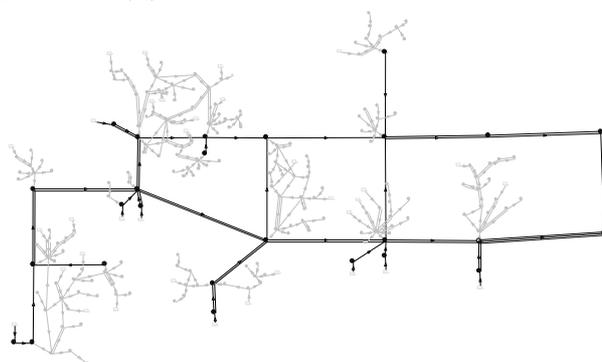


图 1 一个实际电网的电网图

Fig. 1 One actual power system network

从图中可以看出, 低电压等级线路构成供电区域与一个或多个 500 kV 变电站相连。高电压等级断面有如下特点:

(1) 高电压等级断面不包括低电压等级线路, 因此高电压等级断面的线路只包括不同供电区域之间的高电压等级线路。

(2) 高电压等级输电断面线路功率方向是基本一致的。

输电断面从理论上讲是割集, 对于实际电网而言, 具有大量的割集, 其中绝大部分并不是实际需要的, 因此需要充分利用断面的上述特点进行简化, 然后进行断面的搜索。

### 2.1 网络的简化

实际电网通常有多个电压等级, 从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, 实际电网中的输电断面不可能出现在厂站中, 因此一个厂站中所有节点可以合并为一个点。负荷供电区域通常是一个网络, 通常是较低电压等级网络, 并通过变电站与一个或者多个高电压等级母线相连。对于高电压等级断面, 其线路不可能出现在供电区域内部, 因此可以将一个供电区域合并为一个点。

因此，输电断面搜索之前，电网结构可以进行两级简化：

- (1) 将一个厂站中所有节点简化为一个点；
- (2) 将一个负荷供电区域中所有的节点合并为一个点。

图 1 中的实际网络经过简化后如图 2 所示。

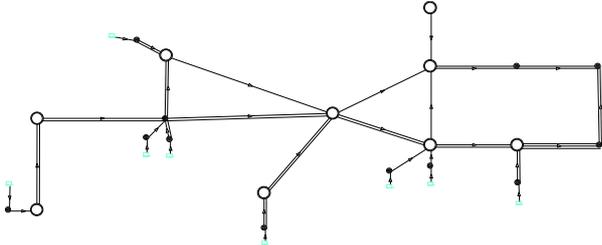


图 2 一个实际电网简化后的电网图

Fig. 2 One actual power system simplified network

图 2 中仅包含高电压等级线路和合并后的供电网络网络，由图中可以看出，电网结构得到大大简化，这样可以减小电网搜索的规模，使输电断面搜索过程中快速并且准确。

### 2.2 高电压等级断面的搜索方法

高电压等级输电断面可以认为是一组同方向(考虑小的反向)的输电线路的集合。如图 2 所示，对于任何一个收缩的供电区域，一般都存在几条功率送出线路和几条功率送入线路，其中的所有送出线路和所有送入线路都可能是输电断面的一部分，但不一定能够形成一个独立的断面。同时注意到，一个供电区域的所有送出线路又是其他供电区域的送入线路，对于存在联系的相邻若干个供电区域，忽略之间的联络线路，再合并为一个更大的供电区域，它的所有功率送出线路或者送入线路就可能形成一个完整的断面。因此，任何一个输电断面实际上是一个或多个供电区域合并后的功率送出线路或者功率送入线路。

每个合并后的供电区域(厂站)都有若干功率输入的线路和功率输出的线路，每个点的功率输入线路可能是其他点的功率输出线路，反之亦然。因此，在断面搜索过程中仅以功率输出线路或者功率输入线路作为基准进行搜索，本文主要以功率输出线路作为基准进行搜索，具体的搜索流程如图 3 所示。

如图 3 所示，在进行两级简化之后，基于网络收缩的高电压等级断面搜索方法搜索的基本步骤如下。

- (1) 选择一个合并区域作为开始的搜寻区域；
- (2) 确定搜索区域的所有功率流出线路和流入线路；

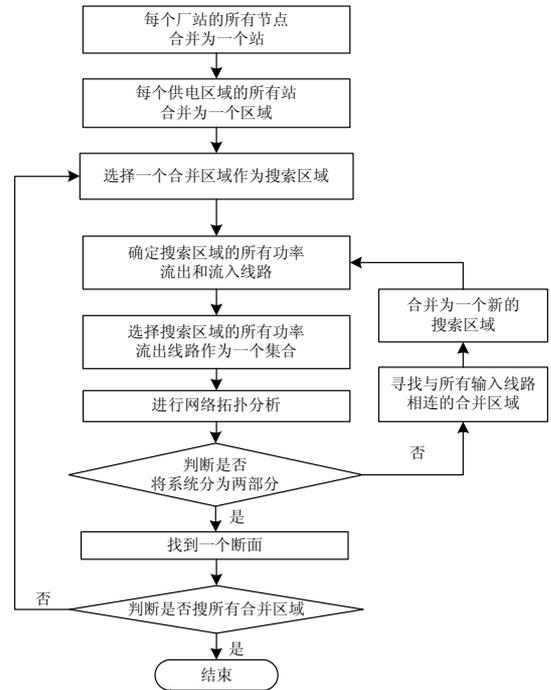


图 3 高电压等级断面搜索流程图

Fig.3 Searching diagram of high voltage base transmission section

(3) 选择搜索区域的所有功率流出线路作为一个集合；

(4) 进行网络拓扑分析，判断是否将系统分为两个独立的网络；如果是，则确认是输电断面，转到步骤(1)进行下一次搜索；否则进行步骤(5)；

(5) 选择搜索区域所有功率流入线路相连的其他合并区域和本搜索区域合并为新的搜索区域，转到步骤(2)。

上述步骤对所有合并区域都要进行搜索，并且需要搜索到包含开始搜索区域所有功率送出线路的断面，这样可以保证没有遗漏。最后搜索到的所有断面中可能存在重复的情况，这样只保留一个即可。鉴于实际电网比较复杂，搜索到的部分断面可能包含较多线路，仅仅是理论上的断面，并不是实际关心的高电压等级断面，因此实际应用时可以忽略包含线路较多的断面。

### 3 电磁环网断面的搜索方法

电磁环网断面相对复杂，它同时包括高电压等级线路和低电压线路，其中的部分线路存在于负荷供电区域中，因此不能将负荷供电区域简化。

电磁环网主要有两种类型：

- (1) 多个高电压等级变电站向负荷中心供电，这

样低电压等级线路通常不具有比较一致的供电方向, 不承担区域之间的功率传输任务;

(2) 与高电压等级线路共同承担功率输送的任务, 通常具有比较一致的功率方向。

对于第一种电磁环网断面, 关心的主要问题是高电压等级线路断开后可能导致低电压等级线路过载; 对于第二种, 关心的问题与高电压等级断面类似, 例如可能导致的输电能力降低问题。对于这两种情况, 需要采用不同的方法进行处理:

(1) 对于过载问题, 只需搜索到负荷供电区域相关的所有高电压等级线路, 用于静态  $N-1$  计算;

(2) 对于输电能力影响问题, 需要采用类似于高电压等级断面的搜索方法进行搜索。

对于实际电网中的电磁环网断面, 高电压等级线路通常是主要的, 低电压等级网络可能比较复杂, 包括多个低电压等线路组合构成的通路, 因此在搜索时, 可以忽略低电压等级线路, 仅搜索高电压等级线路。电磁环网断面搜索方法与非电磁环网断面搜索方法类似, 但需要进行一些调整, 具体的流程图如图 4 所示。

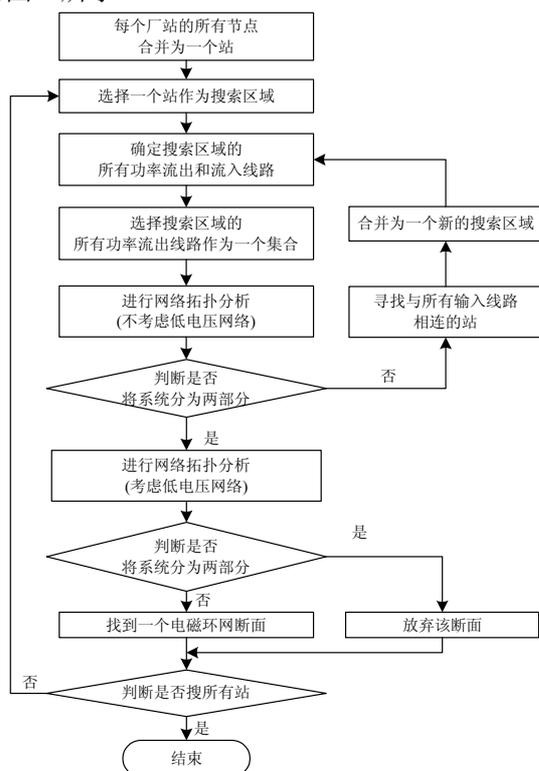


图 4 电磁环网断面的搜索流程图

Fig. 4 Searching diagram of electromagnetic loop transmission section

具体的步骤如下:

(1) 选择任一变电站作为开始的搜索区域;

(2) 确定搜索区域的所有功率流出线路和流入线路;

(3) 选择搜索区域的所有功率流出线路作为一个集合;

(4) 不考虑低电压等级网络, 进行网络拓扑分析, 判断是否将系统分为两个独立的网络; 如果是, 则转到步骤(5); 否则, 进行步骤(6);

(5) 考虑低电压等级网络, 进行网络拓扑分析, 判断是否是不含低电压等级的高电压等级输电断面, 如果是, 则放弃; 否则, 确认是电磁环网输电断面, 进而转到步骤(1)进行下个站的搜索;

(6) 选择搜索区域所有功率流入线路相连的站和本搜索区域合并为新的搜索区域, 转到步骤(2)。

在搜索过程中, 根据电磁环网断面的特点, 需要注意如下事项:

(1) 只搜索电磁环网断面包含的高电压等级线路。因为低电压等级线路可能比较复杂, 而电磁环网断面主要关注高电压等级断面断后的影响;

(2) 电磁环网断面的高电压等级线路必须有线路属于某个供电区域内, 因此需要采用供电区域中高电压等级变电站作为基本单元进行搜索;

(3) 对于比较复杂的电磁环网断面, 可能包括多条高电压等级线路, 这样断面的高电压等级线路通常比较坚强, 因此可以忽略。只有包含的高电压等级线路和通道比较少的电磁环网断面才有必要保留。

## 4 算例分析

以华北-华中联网某水平年数据作为算例, 其中华北和华中通过长治-南阳-荆门 1 000 kV 特高压线路相连, 总节点数为 14 157, 总支路数 17 367。该电网以 500 kV 及以上电压等级作为主干网架, 主要搜索 500 kV 及以上电压等级的高电压输电断面和电磁环网断面。基本过程如下。

### (1) 网络简化

针对整个网络进行两级简化, 第一级简化将一个厂站所有节点简化为一个点, 第二级简化将一个供电区域中的所有节点简化为一个点, 简化后的节点数如表 1 所示。

表 1 网络简化后节点数

Table 1 Bus number of simplified power network

简化类型	简化后节点数	简化后节点数比例
第一级简化	2 662	18.80%
第二级简化	191	1.35%

由表中可以看出, 经过两级简化后, 网络的规

模大大降低。

(2) 高电压等级断面搜索

这种类型断面主要有两类，一类是发电厂功率送出断面，另一类是区域之间、省间、供电区域之间的断面。两者都考虑的情况下，共搜出断面 120 个，在不考虑发电厂功率送出断面，搜索到的断面个数为 54 个。这些断面主要包括三种类型。

1) 关键输电断面，主要集中在省间、区域之间的断面和省内的关键输电通道；

2) 关键断面的相关断面，这些断面基本上与类型 1) 断面属于串联关系，断面中包含的线路部分也可能属于第一种类型关键断面，和正常人为关心的关键断面不太一致，这种断面可以认为是关键断面的延伸，也是值得关注的；

3) 其他输电断面，这些断面符合理论断面的特征，并不是实际关心的断面，一般包含的线路比较多，比较坚强，对系统安全稳定影响比较小。

不考虑发电厂送出断面的情况下，其他 54 个断面中包括所有的省间和区域之间的关键断面，具体如下表 2 所示。

表 2 搜索到的主要断面

Table 2 Main searched transmission sections

序号	断面名称
1	重庆-湖北之间的川渝断面
2	湖北-河南之间的联络断面
3	湖北-江西之间的联络断面
4	华北-华中之间的特高压断面
5	湖北-湖南之间的联络断面
6	蒙西电网外送断面
7	山西-北京、河北南网之间的联络断面
8	山东与外界相连的断面
9	四川-重庆之间的联络断面

此外，还包括省内的部分关键输电断面，例如蒙西、四川电网中的内部断面。

(3) 电磁环网断面搜索

电磁环网断面的搜索一方面需要搜索供电区域内的高电压等级线路，另一方面搜索结构比较简单的电磁环网。本算例搜索到 130 条供电区域的高电压等级线路，搜索到 35 个只有一个或两个通道的电磁环网断面，覆盖了系统中所有的电磁环网。

5 总结

本文以实际电网特点为基础，提出了高电压等级断面和电磁环网断面的快速搜索方法，即基于子网络收缩的输电断面搜索方法，得到结论如下：

(1) 输电断面是满足割集条件的不同地区之间传输功率的线路的集合。实际电网中可以根据线路

的电压等级将输电断面分为高电压等级输电断面(非电磁环网断面)和电磁环网断面；

(2) 高电压等级输电断面搜索之前需要针对电网的厂站和供电区域进行合并简化，分别以每个合并区域的送出线路为起点、基于关联区域自动收缩再合并的方式搜索输电断面，即基于子网络自动收缩的输电断面搜索方法。

(3) 电磁环网断面仅搜索高电压等级线路，搜索之前需要对厂站进行合并简化，以供电区域中的厂站高电压等级送出线路为起点、基于关联厂站自动收缩再合并的方式搜索电磁环网中的高电压等级线路。

本文采用华北-华中算例搜索到了所有的关键输电断面，验证了方法的有效性。本文中的断面自动搜索方法是电网运行状态自动评估和决策的重要组成部分，对电网结构的自动分析和后续稳定性的判断具有重要的意义。

参考文献

[1] 倪宏坤, 徐玉琴, 王立晶. 电力系统并行输电断面风险评估的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(9): 93-96.  
 NI Hongkun, XU Yuqin, WANG Lijing. Research on risk assessment of power system parallel transmission section[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(9): 93-96.

[2] 彭慧敏, 马明, 郑伟, 等. 在线组合输电断面极限集群计算[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 48-53.  
 PENG Huimin, MA Ming, ZHENG Wei, et al. Cluster computing mode for online transfer capability calculation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 48-53.

[3] 宋洪磊, 吴俊勇, 吴林峰. 电力系统紧急情况下的动态分区和自主解列策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 224-230.  
 SONG Honglei, WU Junyong, WU Linfeng. Dynamic partitioning and active-split strategy in power system emergency control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 224-230.

[4] 郑超, 侯俊贤, 严剑峰, 等. 在线动态安全评估与预警系统的功能设计与实现[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 55-60.  
 ZHENG Chao, HOU Junxian, YAN Jianfeng, et al. Functional design and implementation of online dynamic security assessment and early warning system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 55-60.

[5] 严剑峰, 于之虹, 田芳, 等. 电力系统在线动态安全评估和预警系统[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 87-93.  
 YAN Jianfeng, YU Zhihong, TIAN Fang, et al. Dynamic security assessment & early warning system of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(34): 87-93.

[6] 李碧君, 许剑兵, 徐泰山, 等. 大电网安全稳定综合协

- 调防御的工程应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 25-30.
- LI Bijun, XU Jianbing, XU Taishan, et al. Engineering application of integrated and coordinated defense technology of large power system security and stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 25-30.
- [7] 吴文传, 张伯明, 孙宏斌, 等. 在线安全预警和决策支持系统的软件构架和实现[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 23-29.
- WU Wenchuan, ZHANG Boming, SUN Hongbin, et al. A software framework of an early warning and security countermeasure system for electric power control centers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(12): 23-29.
- [8] 张怡, 吴文传, 张伯明, 等. 暂态稳定预警与预防控制系统的开发及应用[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(3): 44-48.
- ZHANG Yi, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Development and application of early warning and preventive control system for transient system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(3): 44-48.
- [9] 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.
- [10] 王增平, 李刚, 任建文. 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): 193-200.
- WANG Zengping, LI Gang, REN Jianwen. A new research algorithm for transmission section based on K shortest paths[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(4): 193-200.
- [11] 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.
- [12] 程临燕, 张保会, 郝志国, 等. 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): 51-56.
- CHENG Linyan, ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, et al. Fast search for key transmission section based on power component of line[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 51-56.
- [13] 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.
- YANG Wenhui, BI Tianshu, MA Qiang, et al. A method for searching transmission section based on wide-area voltage phasors[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(24): 58-63.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 潘莉丽, 刘建华, 彭铖, 等. 电网结构发生变化时潮流转移的快速识别[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 118-121.
- PAN Lili, LIU Jianhua, PENG Cheng, et al. Fast recognition of power flow transferring under change of power network topology[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 118-121.
- [17] 孔涛, 王洪涛, 刘玉田, 等. 500 kV-220 kV 电磁环网开环研究[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(12): 13-16.
- KONG Tao, WANG Hongtao, LIU Yutian, et al. Study on opening 500 kV-220 kV electromagnetic loop circuit[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(12): 13-16.
- [18] 白宏坤, 李干生. 关于电磁环网弱开环方式的探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(2): 60-63.
- BAI Hongkun, LI Gansheng. Discussion on weak open-loop mode of electromagnetic loop[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(2): 60-63.
- [19] 胡扬宇, 付红军, 张毅明, 等. 特高压南阳站建成后鄂豫断面电磁环网运行分析[J]. 电网技术, 2011, 35(6): 22-26.
- HU Yangyu, FU Hongjun, ZHANG Yiming, et al. Analysis on electromagnetically coupled loop operation of tie line connecting hubei power grid and henan power grid after building up of Nanyang UHVAC substation[J]. Power System Technology, 2011, 35(6): 22-26.
- [20] 杨冬, 刘玉田. 特高压初期的电磁环网影响分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 77-80.
- YANG Dong, LIU Yutian. Influence of electromagnetic loop in early ultra-high voltage grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 77-80.

收稿日期: 2014-09-10; 修回日期: 2014-12-29

作者简介:

侯俊贤(1978-), 男, 高级工程师, 博士研究生, 主要从事电力系统建模和仿真技术研究和软件开发工作; E-mail:houljx@epri.sgcc.com.cn

韩民晓(1963-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力电子设备建模和仿真、仿真分析技术研究等;

董毅峰(1985-), 男, 工程师, 主要从事电力系统仿真技术研究和软件开发。

(编辑 姜新丽)