

# 一种基于图论搜索的限制短路电流分区方法

郝文斌<sup>1</sup>, 夏春<sup>2,3</sup>, 王彪<sup>2</sup>, 唐伦<sup>2</sup>, 李博<sup>1</sup>, 王晓旭<sup>2,4</sup>

(1. 国网成都供电公司, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610072;  
3. 国家电网公司西南分部, 四川 成都 610041; 4. 重庆大学电气工程学院, 重庆 400044)

**摘要:** 解开部分 500 kV/220 kV 电磁环网, 对 220 kV 电网进行分区是限制 220 kV 电网短路电流短路的重要措施。针对目前依靠运行经验手动进行计算得到分区方案的局限, 提出了一种限短路电流的电网自动分区算法。该方法以 500 kV 主变负载尽可能均衡为目标, 计及短路电流、线路输送功率、变电站下网潮流等约束, 同时考虑电网拓扑结构、线路潮流等因素, 基于图论搜索及 Visual Studio 调用 PSASP 进行求解。某市丰大方式下(2015 年规划)220 kV 电网分区结果表明了所提算法的有效性。

**关键词:** 图论搜索; 限制短路电流; 解环; 220 kV 电网分区; PSASP 调用

## A short-circuit current limiting partitioning method based on graph theory search

HAO Wenbin<sup>1</sup>, XIA Chun<sup>2,3</sup>, WANG Biao<sup>2</sup>, TANG Lun<sup>2</sup>, LI Bo<sup>1</sup>, WANG Xiaoxu<sup>2,4</sup>

(1. State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu 610041, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610072, China; 3. Southwest Subsection of State Grid Corporation of China, Chengdu 610041, China;  
4. School of Electrical Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** Breaking part of 500 kV/220 kV electromagnetic loop network and 220 kV network partition operation is an important measure to limit the short-circuit current of 220 kV bus. For the limitations of partitioning scheme relying on experience, this paper presents a grid partitioning algorithm about short-circuit current limitations. The goal of this method is to balance 500 kV transformer load, taking into account the constraints such as short-circuit current, lines' transmission power, substations' power, network topology and line power flow. This problem is solved by graph theory search and Visual Studio calling PSASP. Based on the data of a city power grid plan of 2015, the grid partitioning results show that the proposed algorithm is effective.

**Key words:** graph theory search; short-circuit current limitations; breaking electromagnetic loop network; 220 kV network partition operation; calling PSASP

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)17-0038-07

## 0 引言

近年来,我国电网建设不断加快,500 kV、220 kV 电磁环网联系越来越紧密。同时,随着经济的快速发展,城市电网的规模也越来越大。这些都使得系统电气联系得以加强的同时,220 kV 母线短路电流大量超过开关遮断容量存在可能。限制短路电流的措施较多,如改变电网接线方式、多母线分裂运行或母线分段运行、采用高阻抗变压器<sup>[1-7]</sup>等。解开部分 500 kV/220 kV 电磁环网,对 220 kV 电网进行分区运行,是大面积降低短路电流水平的有效方法<sup>[8-12]</sup>。同时,电网的分层分区运行也已成为我国

电力系统的发展趋势,在某些负荷大、负荷密度高的城市电网,已经采取了电力系统分区措施<sup>[10-18]</sup>。

分区是指断开某些 220 kV 线路,形成以 1 个或多个 500 kV 变电站为中心,带动 220 kV 地区负荷分片运行的网络格局,即不同分区的 220 kV 电网间解环(或部分解环)运行<sup>[19-24]</sup>。220 kV 电网分区运行时,以 500 kV 网作为骨干网架,在各 220 kV 电网之间传输功率;而各分区内的 220 kV 变电站则主要对区域内 110 kV 电网供电。

目前,各电网分区主要为了限制短路电流。现有分区方案大多依靠运行人员的工作经验,手动断开关键线路,在进行大量的潮流计算和短路计算之

后形成。现有人工分区方法存在着较大的局限性, 主要有: (1)计算次数多, 这在网架结构复杂的情况下尤为明显; (2)工作量大, 当电力网络改变(如新投入一个 500 kV 变电站)时, 又需要重复校验与计算; (3)得到的可行方案数有限, 有可能无法寻找出所有可行方案。

本文在分析电网分区所应考虑的原则和因素的基础上, 提出了一种基于图论搜索的分区方法, 并实现了电力系统综合程序(PSASP)相关计算的循环调用, 从而克服人工经验计算所带来的计算次数多、工作量大等问题。

## 1 分区原则及数学模型

对电网进行分区运行, 最大驱动力来自解决 220 kV 母线短路电流超标问题。在限制短路电流的同时, 还需要遵循以下原则<sup>[22]</sup>: (1)各分区的主变负载要尽可能均衡分布; (2)每个分区至少要有有一个 500 kV 变电站以确保供电可靠性; (3)每个分区 220 kV 母线短路电流需留有一定裕度, 以便分区后仍可以对电网进行扩展。根据以上原则, 并考虑其余因素, 从而建立数学模型。

### 1.1 目标函数

根据主变负载尽量均衡分布原则, 将目标函数定义为

$$\min F = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\bar{D} - D_i)^2 \quad (1)$$

式中:  $\bar{D}$  为该电网所有 500 kV 主变的平均负载率, 计算公式为  $\bar{D} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N D_i$ ;  $N$  为该电网 500 kV 主变个数;  $D_i$  为该电网第  $i$  台 500 kV 主变的负载率, 按照下网潮流求取;  $D_i = \sum_{j=1}^{n_i} L_j$ ,  $n_i$  为该台主变所连的 220 kV 线路出线数,  $L_j$  为该 220 kV 线路输送的有功功率。

### 1.2 约束条件

#### 1.2.1 500 kV 主变下网潮流约束

$$\sum_{j=1}^{n_i} L_j < P_i \quad (2)$$

其中:  $P_i$  为第  $i$  台 500 kV 主变的额定功率;  $L_j$  为第  $i$  台 500 kV 主变所连的第  $j$  条交流线输送的有功功率;  $n_i$  为第  $i$  台 500 kV 主变所连交流线路总数。

#### 1.2.2 线路潮流约束

$$I_j < I_{j\max} \quad (3)$$

式中:  $I_j$  为第  $j$  条线路的实际电流;  $I_{j\max}$  为第  $j$  条

线路的最大允许电流。

#### 1.2.3 母线短路电流约束

$$I_k < I_{k\text{limit}} \quad (4)$$

其中:  $I_k$  为第  $k$  条母线的短路电流;  $I_{k\text{limit}}$  为第  $k$  条母线的开关遮断容量。

#### 1.2.4 供电可靠性约束

$$n_k \geq 1 \quad (5)$$

式中:  $n_k$  为第  $k$  分区中 500 kV 主变数量,  $n_k \geq 1$  意味着每个分区至少应有一个 500 kV 变电站。

## 2 分区方法实现思路与流程

### 2.1 500 kV 站点间关键断面搜索

220 kV 电网分区方法的重点在于识别 500 kV 变电站之间的关键断面, 断开部分 220 kV 线路, 从而实现分区运行。

电力系统是由发达的高、低压电网将众多电源和负荷连接在一起的整体。不考虑网络元件的特性而只研究网络的拓扑关系时, 可将电力系统抽象成一个图(Graph)。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结关系, 即节点与支路的关系。本文基于图论中路径搜索算法, 并考虑线路潮流状态, 识别关键线路及断面。

#### 2.1.1 深度优先搜索算法<sup>[24-27]</sup>

假定图 G 有  $n$  个节点, 若节点  $v_i$  与  $v_j$  间有边直接相连, 则称节点  $v_i$  与  $v_j$  互为邻近节点。例如图 1 中的 a 和 b, b 和 c 等。

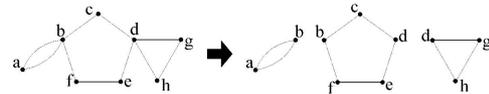


图 1 一个简单的图

Fig. 1 A simple graph

定义方阵  $A_n = \{a_{ij}\}$  为图 G 的邻接矩阵, 其元素参照以下原则确定: 若节点  $v_i$  与  $v_j$  互为邻近节点, 则  $a_{ij} = w_{ij}$ ,  $w_{ij}$  为边  $\langle v_i, v_j \rangle$  的权值, 一般根据应用场合代表不同的含义, 否则  $a_{ij}$  为无穷大, 并规定当  $i = j$  时,  $a_{ij} = 0$ 。根据该原则, 方阵  $A$  的对角元素一定为 0 且 G 为无向图时,  $A$  为对称阵。假定图 G 有  $n$  个节点, 若节点  $v_i$  与  $v_j$  间通过有限条边相连, 则节点  $v_i$  与  $v_j$  间的任何一条通路称为一条路径。

在搜寻任意两节点之间的路径时, 需要对图的所有节点进行遍历。图的遍历通常有“深度优先搜索”和“广度优先搜索”方法, 二者是人工智能的一个基础, 本文中采用的是深度优先搜索算法。

深度优先搜索遍历类似于树的先序遍历。假定给定图 G 的初态是所有顶点均未被访问过,在 G 中任选一个顶点  $i$  作为遍历的初始点,则深度优先搜索递归调用包含以下操作:

- (1) 访问搜索到的未被访问的邻接点;
  - (2) 将此顶点的 visited 数组元素置 1;
  - (3) 搜索该顶点的未被访问的邻接点,若该邻接点存在,则从此邻接点开始进行同样的访问和搜索。
- 通过该算法,在图的拓扑结构确定的前提下,可以搜索得到任意两节点之间的所有路径。

### 2.1.2 500 kV 站点间关键断面搜索

#### (1) 站点编号及路径搜索

基于 PSASP 计算文件,可以对电网所有 500 kV 及 220 kV 变电站进行编号。同时读入站点之间的初始连接状态,形成邻接矩阵。将每条边(即 220 kV 交流线路)的长度都赋值为 1,即所有边的权重都完全一致。进一步,利用深度优先搜索算法,遍历图中所有节点,完成任意两个 500 kV 站点之间所有路径的搜索,最后将路径按照长度从小到大排序并储存。

#### (2) 220 kV 线路断开优先级别的确定

结合运行实际经验,定义了四条断开线路优先级的确定原则:

- 原则 1: 同一路径中,优先断开潮流负载轻的边(输电线路);
- 原则 2: 同一路径中,优先断开两个 500 kV 站点间路径出现次数多的边(输电线路);
- 原则 3: 同一路径中,优先断开 220 kV 站点之间的边(输电线路);
- 原则 4: 对所有路径,优先断开短路径中的边(输电线路);

按照上述原则,可以确定两个 500 kV 变电站之间 220 kV 线路断开优先级,从而确定断面的优先级别。

下面将以一个简单的例子对上述原则进行说明。图 2 中,JS 站和 JJ 站为 500 kV 变电站,其余为 220 kV 变电站。由于图中任意两节点之间边的长度都为 1,(不考虑线路的实际长度和阻抗大小)。则 JS 站到 JJ 站之间的所有路径,按照长度从小到大排序依次为

- 路径 1: JS-HS-JJ
- 路径 2: JS-SY-HTC-JJ
- 路径 3: JS-XJD-LX-JJ
- 路径 4: JS-SY-HTC-WH-JJ
- 路径 5: JS-WS-XJD-LX-JJ
- 路径 6: JS-DS-XJD-LX-JJ
- .....

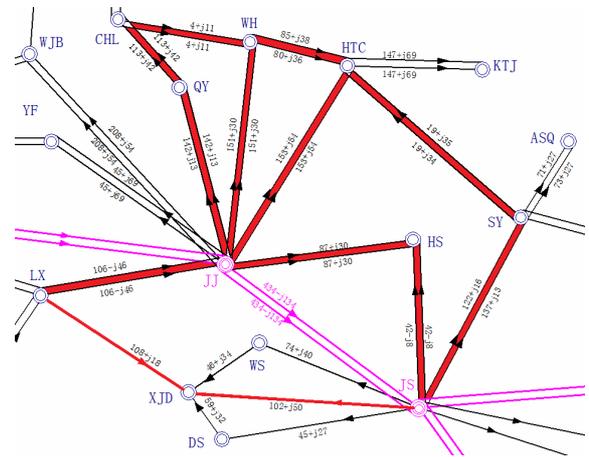


图 2 某两个 500 kV 变电站之间潮流接线图  
Fig. 2 Power flow and electric connection of two 500 kV substations

按照原则 4,应该断开路径长度较短的路径中的边(线路),由此前三条路径中的边断开优先级别较高(断开前三条路径中的某些边已经可以彻底断开 JS-JJ 两站 220 kV 电气联系),这三条路径中的边(线路)应该首先保证断开;

按照原则 1,在同一路径中,应该断开潮流负载轻的线路,则路径 1 中应首先断开 JS-HS 线,路径 2 中应首先断开 SY-HTC 线,路径 3 中三条边潮流负载相差不大;

按照原则 2,应该优先断开两个站点之间出现次数较多的边(线路),则路径 2 中应首先断开 SY-HTC 线,路径 3 中应首先断开 XJD-LX 线;

按照原则 3,同一路径中,应该优先断开 220 kV 站点之间的边(线路),则路径 2 中应首先断开 SY-HTC 线,路径 3 中应首先断开 XJD-LX 线。

至此,可以确定 JS-JJ 两站之间需要优先断开的线路为: JS-HS 线, SY-HTC 线, XJD-LX 线。这三条线路就组成了 JS-JJ 两站之间优先级别最高的断面。

### 2.2 PSASP 计算数据修改、调用及结果读取

在建立数学模型、确定断面优先级别之后,需要进行大量的潮流计算和短路电流计算。由于方案数较多,传统的手动计算无法满足大量计算的要求,这就需要调用相关分析软件进行自动计算,降低运行人员计算量。目前实际运行中,电力系统分析综合程序(PSASP)以及中国版 BPA 是使用较多的两个软件。本文以 PSASP 作为潮流计算和短路计算的基本工具,基于 Visual Studio 予以循环调用。

目前,仅有不多的文献对 PSASP 的二次开发进行了研究<sup>[19,28]</sup>,其中采用 Visual Studio 实现的就更少。本文基于有限参考资料,对如何修改 PSASP

计算数据、调用 PSASP 进行相关计算、读取计算结果进行了有益探索, 并取得了较好的效果。

### 2.2.1 PSASP 计算数据的修改

在每一次计算中, PSASP 数据包 Temp 文件夹中都会保留当前作业号的计算数据和结果, 存储为 txt 格式; 计算完成后同时将该作业号所对应的计算结果保存在 Result 文件夹中, 存储为数据库格式。考虑到 txt 格式便于 Visual Studio 读取和修改, 本文将利用 Temp 文件夹中的计算数据作为分区计算的基础文件。

潮流计算输入文件以 LFL\*方式命名; 短路计算数据包括潮流数据文件(LFL\*)、潮流结果文件(LFLP\*)、暂稳数据文件(ST.S\*)以及参数库文件(DATALIB.DAT), 其中\*为数字。基于 Visual Studio, 读入上述所有数据文件, 并根据每个文件的存储格式, 可以实现按位修改。如在分区算法中, 主要修改的交流线数据文件 LFL2, 对交流线状态 0/1 进行变动, 从而实现线路的开断。

### 2.2.2 PSASP 相关计算的调用

PSASP 整合了较多的计算模块, 每个模块都对应着一个可执行文件 exe。如潮流计算模块为 Wmlf.exe; 短路计算模块为 Wmscm.exe。Visual Studio 中有较多的调用 exe 的指令, 本文采用的是 WinExec 指令。

同时, Visual Studio 调用 PSASP 相关模块计算后, 该计算完成后模块并不会自动退出, 将会继续占用内存空间。为了避免内存溢出, 需要在计算结束后结束该进程, 这就需要使用到 Kill 指令。

完整的潮流调用计算指令为:

```
WinExec("Wmlf.exe",SW_SHOW);
```

```
Sleep(10000);
```

```
WinExec("taskkill/f/imWmlf.EXE/t",SW_SHOW  
NORMAL);
```

### 2.2.3 PSASP 计算结果的读取

类似于计算数据的修改, 计算结果的读取也是先读入相应的结果文件, 然后按位读入、字符转换、储存结果。如潮流计算结果文件名都为: LFLP\*, 其中\*为数字; 短路电流计算结果文件为: STR12。

### 2.2.4 Visual Studio 与 PSASP 各自功能与任务

本文基于 Visual Studio 编写程序, 实现对 PSASP 的自动调用。二者各自的功能与任务可以由图 3 所示。由图, Visual Studio 自编程序可以实现 (1)PSASP 计算数据的读取和修改; (2)调用 PSASP 潮流计算和短路计算模块; (3)读取 PSASP 计算结果; (4)执行自动分区算法。PSASP 根据 Visual Studio 自编程序修改好的计算数据, 执行潮流计算和短路

电流计算, 最后生成计算结果由 Visual Studio 自编程序完成读取。

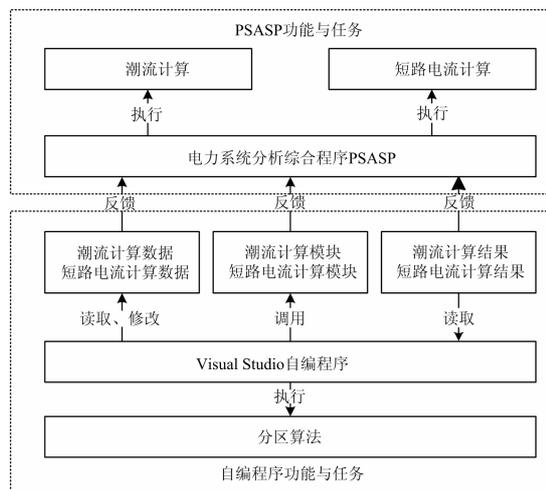


图 3 Visual Studio 与 PSASP 功能、任务示意图

Fig. 3 Function and task of Visual Studio and PSASP

## 2.3 分区计算流程

根据以上分析, 可以得到图 4 所示的计算流程, 在计算结束后得到分区结果。要说明的是, 限于篇幅, 在图中并没有标出潮流不收敛情况下的处理结果。在某种分区下, 如果潮流计算不收敛, 程序仍将保存该分区方案并做特殊标记, 待所有计算结束后一并输出。

## 3 算例分析

根据某市规划数据, 2015 年丰大方式下该市电网共有 7 座 500 kV、50 余座 220 kV 变电站, 最大负荷将达到 9 325 MW。在计算中, 短路电流主要考虑 500 kV 和 220 kV 母线的三相短路电流, 未分区情况下, 共计 22 个站点的短路电流超过开关遮断容量。

本文基于 Visual Studio 编程, 基于所提方法, 遍历所有分区方案进行计算求解, 得到优先级最高的分区方案, 将该方案下主变负载率与分区前进行对比, 所得结果如表 1 所示。

表 1 分区前后 500 kV 主变负载情况

Table 1 500 kV main transformer load before and after partition

| 区域号 | 分区前 |       | 分区后 |       |
|-----|-----|-------|-----|-------|
|     | 主变名 | 负载率/% | 主变名 | 负载率/% |
| 1   | LW  | 45.45 | LW  | 52.40 |
| 1   | XD  | 66.20 | XD  | 58.55 |
| 2   | TX  | 56.29 | TX  | 48.58 |
| 2   | JS  | 55.35 | JS  | 55.10 |
| 3   | JJ  | 56.55 | JJ  | 59.20 |
| 3   | SZ  | 48.80 | SZ  | 56.00 |
| 3   | DJ  | 37.29 | DJ  | 37.79 |



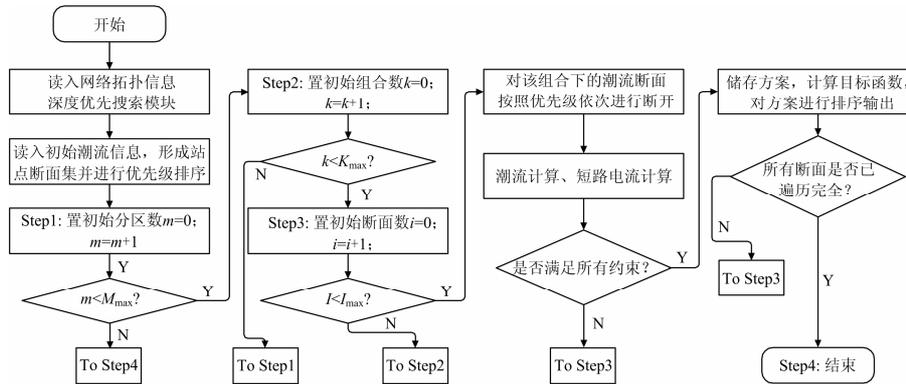


图 4 分区计算流程图

Fig. 4 Flow chart of partition

分区前, 全网 7 个 500 kV 变电站主变负载率方差为 0.001 06, 分区后方差减小为 0.000 68, 主变负载更加均衡。

在使得主变负载更加均衡的同时, 该分区方案还有效降低了系统短路电流, 表 2 为分区前后部分母线短路电流对比结果。可以看出, 根据分区方法所确定的方案, 短路电流水平都呈下降趋势, 所有母线短路电流都在 50 kA 以内, 整个系统短路容量大幅提高。

表 2 分区前后短路电流变化情况

Table 2 Short circuit current changes before and after the partition

| 母线名    | 短路电流在/kA |       | 分区前后短路电流差值/kA |
|--------|----------|-------|---------------|
|        | 分区前      | 分区后   |               |
| JJ220  | 72.59    | 45.02 | 27.57         |
| DJ220  | 67.8     | 49.76 | 18.04         |
| XD220  | 64.88    | 40.93 | 23.95         |
| YDQ220 | 61.9     | 31.99 | 29.91         |
| LW220  | 61.45    | 41.85 | 19.6          |
| SY220  | 57.44    | 32.23 | 25.21         |
| SZ220  | 57.28    | 41.56 | 15.72         |
| ZT220  | 56.28    | 47.24 | 9.04          |
| CJS220 | 55.98    | 47.46 | 8.52          |
| HTC220 | 55.5     | 25.75 | 29.75         |
| SS220  | 54.58    | 34.46 | 20.12         |
| TX220  | 54.56    | 38.55 | 16.01         |
| WJB220 | 53.86    | 45.48 | 8.38          |
| FZ220  | 53.27    | 43.67 | 9.6           |
| HL220  | 53.21    | 40.77 | 12.44         |
| DMP220 | 53.17    | 32.63 | 20.54         |

## 4 结语

本文所提的基于图论搜索的 220 kV 电网分区方法, 以主变负载尽量均衡为目标函数, 短路电流、线路潮流、主变负载等为约束条件建立数学模型,

并考虑网络拓扑结构和线路潮流信息, 通过定义线路断开优先级准则, 从而确定 500 kV 站点之间的断面优先级。本方法同时实现了电力系统主流分析软件 PSASP 的数据修改、循环调用计算以及结果的读取功能。

以某市 2015 年规划数据作为计算条件, 所得分区方案在满足主变负载更加均衡的同时, 大幅降低系统短路电流, 分区效果明显, 从而验证了算法的有效性。同时, 该分区方法可以通过调用 PSASP 进行自动计算, 减少了运行人员手动进行大量潮流和短路计算的工作量, 提高了工作效率。

## 参考文献

- [1] 韩戈, 韩柳, 吴琳. 各种限制电网短路电流措施的应用与发展[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 141-144.  
HAN Ge, HAN Liu, WU Lin. Application and development of methods on limiting power grid's short-circuit current[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 141-144.
- [2] 冯树海, 於益军, 王礼文, 等. 适用于拓扑调整的短路电流快速计算方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(8): 28-33.  
FENG Shuhai, YU Yijun, WANG Liwen, et al. A method of fast short-circuit current calculation for topology adjustment[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(8): 28-33.
- [3] 梁纪峰, 刘文颖, 梁才, 等. 500 kV 自耦变中性点串接小电抗对接地短路电流限制效果分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(13): 96-99.  
LIANG Jifeng, LIU Wenying, LIANG Cai, et al. Analysis of limiting effect of 500 kV autotransformer neutral grounding by small reactance on ground short-circuit

- current[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(13): 96-99.
- [4] 刘楠, 唐晓骏, 张文朝, 等. 特高压接入河南电网后电磁环网解环方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(2): 131-135.  
LIU Nan, TANG Xiaojun, ZHANG Wenchao, et al. Study on electromagnetic ring opening in Henan province under ultra-high voltage power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(2): 131-135.
- [5] 何肇. 关于改善华东电网结构, 降低短路容量方案的探讨[J]. 电网技术, 2004, 28(2): 28-31.  
HE Zhao. A discussion on scheme of improving structure of east China power grid to reduce short circuit capability[J]. Power System Technology, 2004, 28(2): 28-31.
- [6] 李继红, 黄良宝, 徐谦, 等. 一种降低短路电流水平的措施-母线分裂运行[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 62-71.  
LI Jihong, HUANG Liangbao, XU Qian, et al. A method of reducing the level of short-circuit current measures-bus division run[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(14): 62-71.
- [7] 高凯平. 限制短路电流的方法[J]. 电力安全技术, 2000(3): 54.  
GAO Kaiping. The method of limiting short-circuit current[J]. Electric Safety Technology, 2000(3): 54.
- [8] 周坚, 胡宏, 庄侃沁, 等. 华东 500 kV 电网短路电流分析及其限制措施探讨[J]. 华东电力, 2006, 34(7): 55-59.  
ZHOU Jian, HU Hong, ZHUANG Kanqin, et al. Short circuit current of 500 kV East China power grid and its limitation[J]. China Electric Power, 2006, 34(7): 55-59.
- [9] 袁娟, 刘文颖, 董明齐, 等. 西北电网短路电流的限制措施[J]. 电网技术, 2007, 31(10): 42-45.  
YUAN Juan, LIU Wenyong, DONG Mingqi, et al. Application of measures limiting short circuit currents in Northwest China Power Grid[J]. Power System Technology, 2007, 31(10): 42-45.
- [10] 李晗, 罗建生. 北京电网分层分区与调度运行分析[J]. 现代电力, 2005, 22(4): 29-33.  
LI Han, LUO Jiansheng. Analysis of delamination and subarea, dispatching control of power system in Beijing[J]. Modern Electric Power, 2005, 22(4): 29-33.
- [11] 陆圣芝, 胡伟, 罗建裕. 江苏电网分层分区研究[J]. 江苏电机工程, 2006, 25(3): 11-13.  
LU Shengzhi, HU Wei, LUO Jianyu. Jiangsu Power Grid hierarchical partitioning studies[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2006, 25(3): 11-13.
- [12] 林章岁, 郑春平, 吴威. 福建电网 500 kV/220 kV 电磁环网解环运行的可行性研究[J]. 福建电力, 2003, 23(2): 1-4.  
LIN Zhangsui, ZHENG Chunping, WU Wei. Feasibility study of Fujian Power Grid 500 kV/220 kV electromagnetic loop runs[J]. Fujian Power and Electrical Engineering, 2003, 23(2): 1-4.
- [13] 张斌, 徐志生. “西电东送”格局下湖南电网结构及分层分区研究[J]. 湖南电力, 2003, 23(4): 9-12.  
ZHANG Bin, XU Zhisheng. Research on Hunan power network structure along with voltage-grading and district-dividing under the condition of electricity transmission from West to East[J]. Hunan Electric Power, 2003, 23(4): 9-12.
- [14] 姚文峰. 广东电网“十二五”分区供电研究[J]. 南方电网技术, 2011, 5(6): 86-89.  
YAO Wenfeng. Study on the sub-area power supply for Guangdong Power Grid during “12th Five-Year” period[J]. Southern Power System Technology, 2011, 5(6): 86-89.
- [15] 赵峰, 孙宏斌, 余志文, 等. 计及分裂运行和无初始地理分区厂站的电网自动电气分区[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(6): 33-38.  
ZHAO Feng, SUN Hongbin, YU Zhiwen, et al. Automatic discovery of power system electrical zones considering stations in split operation mode as well as stations without initial geography zone[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(6): 33-38.
- [16] 潘高峰, 王星华, 彭显刚, 等. 复杂网络的社团发现方法在电网分区识别中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(13): 116-121.  
PAN Gaofeng, WANG Xinghua, PENG Xiangang, et al. Study of power grid partition identification method based on community structure detection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(13): 116-121.
- [17] 刘玉田, 谭冰雪. 大电网恢复适应性分区方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 49-54.  
LIU Yutian, TAN Bingxue. Adaptive partition method for large power system restoration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 49-54.
- [18] 梁海平, 芦佳硕, 顾雪平. 基于恢复路径转移系数的电网黑启动分区策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(2): 1-7.  
LIANG Haiping, LU Jiashuo, GU Xueping. Black-start

- network partitioning based on the restoration path altering coefficient[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2014, 26(2): 1-7.
- [19] 田华, 王卿, 朱峰, 等. 基于 PSASP 程序的短路电流计算结果分析比较探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(1): 56-65.
- TIAN Hua, WANG Qing, ZHU Feng, et al. Comparative study of short-circuit current calculation results based on PSASP software[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(1): 56-65.
- [20] 王寓, 王主丁, 张宗益, 等. 国内外常用短路电流计算标准和方法的比较研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(20): 148-152.
- WANG Yu, WANG Zhuding, ZHANG Zongyi, et al. Comparison and research on the commonly used standards and methods of short-circuit current calculation[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(20): 148-152.
- [21] 杨冬, 刘玉田, 牛新生. 分区电网限流运行方式的综合决策方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 34-38.
- YANG Dong, LIU Yutian, NIU Xinsheng. Integrated decision method of operation schemes for limiting short-circuit currents in district grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 34-38.
- [22] 徐贤, 丁涛, 万秋兰. 限制短路电流的 220 kV 电网分区优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 37(22): 98-101.
- XU Xian, DING Tao, WAN Qiulan. 220 kV power grid district-dividing optimization for limiting fault current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 37(22): 98-101.
- [23] 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.
- [24] 马丽叶, 贾彬, 卢志刚, 等. 基于静态安全性和实时供电能力的输电网安全等级研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 229-237.
- MA Liye, JIA Bin, LU Zhigang, et al. Research on security classification of transmission network considering static security and real-time power supply capability[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 229-237.
- [25] 李刚, 王增平, 任建文, 等. 基于图论分区与改进 BFS 算法搜索安全约束集的防联锁过载控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(11): 219-229.
- LI Gang, WANG Zengping, REN Jianwen, et al. A control strategy to prevent cascading overload with security constraint set searched by graph theory partition and improved BFS algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(11): 219-229.
- [26] 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.
- [27] 殷剑宏, 吴开亚. 图论及其算法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 2003.
- [28] 黄飞, 王武双, 王晓茹. 基于 PSASP 暂态稳定计算的数据接口研究[J]. 电气应用, 2011, 30(9): 56-59.
- HUANG Fei, WANG Wushuang, WANG Xiaoru. Data interface research PSASP calculated based on transient stability[J]. Electrotechnical Application, 2011, 30(9): 56-59.

收稿日期: 2014-11-20

作者简介:

郝文斌(1976-), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统继电保护及调度运行研究; E-mail: hwb760817@163.com

夏春(1989-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统运行备用容量;

王彪(1985-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统紧急控制。

(编辑 葛艳娜)