

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190562

## 基于静态安全域的交直流混联大电网关键线路辨识

辛建波<sup>1</sup>, 杨程祥<sup>2</sup>, 舒展<sup>3</sup>, 周博<sup>2</sup>, 姚伟<sup>2</sup>, 谌艳红<sup>1</sup>, 文劲宇<sup>2</sup>

(1. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330077; 2. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学), 湖北 武汉 430074; 3. 国网江西省电力有限公司电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

**摘要:** 特高压直流输电系统的相继投运导致电力系统运行特性改变, 交直流混联大电网的薄弱环节将出现变化。为辨识出交直流混联电网中的关键线路, 避免大停电事故的发生, 提出一种基于静态安全域的交直流混联电网关键线路辨识方法。采用静态安全域分析方法构建交直流混联电力系统的静态安全域, 考虑交流线路潮流越限与直流逆变站闭锁判据, 结合支路潮流模型, 提出适用于交直流混联电力系统的静态安全裕度计算方法。以静态安全裕度为指标, 给出交直流混联电力系统的关键线路辨识流程。最后使用江西电网实际电力系统进行仿真分析, 结果验证了所提方法的合理性和有效性。

**关键词:** 交直流混联电力系统; 关键线路辨识; 支路潮流模型; 静态安全域; 潮流越限; 直流闭锁

### Identification of critical lines in AC/DC hybrid large power grid based on steady-state security region

XIN Jianbo<sup>1</sup>, YANG Chengxiang<sup>2</sup>, SHU Zhan<sup>3</sup>, ZHOU Bo<sup>2</sup>, YAO Wei<sup>2</sup>, CHEN Yanhong<sup>1</sup>, WEN Jinyu<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangxi Electric Power Company Limited, Nanchang 330077, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. Electric Power Research Institute of State Grid Jiangxi Electric Power Company, Nanchang 330096, China)

**Abstract:** The successive commissioning of UHVDC transmission systems leads to changes in the operating characteristics of power system, the weak link in AC/DC hybrid power grid will change. In order to identify the critical lines in AC/DC hybrid power grid and avoid the occurrence of blackouts, a critical lines identification method based on steady-state security region for AC/DC hybrid power grid is proposed. The steady-state security region analysis method is used to construct the steady-state security region of AC/DC hybrid power system. Considering the power flow limit of AC line and the blocking criterion of DC inverter, the steady-state security margin calculation method for AC/DC hybrid power system is proposed combined with the branch flow model. The critical lines identification process of AC/DC hybrid power system is given with the steady-state security margin as an index. Finally, the simulation analysis is carried out on the actual power system of Jiangxi Power Grid, and the results demonstrate the effectiveness and rationality of the proposed method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51577075).

**Key words:** AC/DC hybrid power system; critical lines identification; branch flow model; steady-state security region; power flow violation; DC blocking

## 0 引言

近年来, 各国电网发生多次大停电事故, 造成巨大经济损失, 引起人们的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。事故分析表明, 电力系统中存在的少数关键线路和薄弱环节对大停电事故的蔓延具有推波助澜的作用<sup>[3]</sup>。与此同

时, 随着特高压直流输电技术的快速发展和直流线路的相继投运, 我国已形成多个区域电网之间的直流互联<sup>[4]</sup>。2014年川渝电网复龙-奉贤、锦屏-苏州、宜宾-金华三回±800 kV 特高压直流输电工程送华东电网, 形成了典型的直流多送出多馈入互联系统<sup>[5]</sup>。江西电网既有特高压直流落点, 也有特高压交流落点, 形成复杂的交直流混联电网<sup>[6]</sup>。交直流系统之间相互影响, 可能形成新的电网运行薄弱环节,

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51577075)

从而加剧了大停电事故的发生风险<sup>[7]</sup>。因此,若能辨识出交直流混联电网中的关键线路,则可作为电力系统实际运行和规划的重要参考,对预防交直流混联电力系统大停电事故,提高电力系统的安全稳定性具有重要的意义。

电力系统关键线路的辨识已有大量研究。文献[8]基于连锁过载故障发生机理,综合潮流转移指标和电网潮流熵指标对电网关键线路进行辨识。文献[9]利用基于直流潮流计算的电气介数来辨识复杂电网中的脆弱线路,并采用新的网络效能指标验证该方法的有效性。文献[10]建立基于事故链的连锁故障仿真模型,辨识对电力系统连锁故障产生重要影响的关键线路。文献[11]利用电力系统静态安全域分析的思想建立关键线路评估模型,以线路开断后系统的安全裕度值作为评估指标。但以上研究均只是针对纯交流系统。此外,部分文献对交直流混联电力系统展开研究。文献[12]基于熵权法建立关键线路评估模型,提出一种交直流混联电网的输电线路脆弱度评估方法;但有关脆弱线路评估指标的合理性有待商榷,而且不同脆弱性指标对系统安全性影响程度有待研究。文献[13]提出了基于节点流量重要度的电网关键节点辨识方法,能够辨识交直流混联电网的关键节点,但该方法没有考虑输电线路开断对系统安全性的影响。

针对以上问题,本文提出一种基于静态安全域的交直流混联电网关键线路辨识方法。采用静态安全域分析方法构建交直流混联电网的静态安全域,考虑交流线路潮流越限与直流逆变站闭锁判据,结合支路潮流模型,提出适用于交直流混联电网的静态安全裕度计算方法。该方法能够同时考虑交直流混联电网的系统网架结构和运行状态的影响,定量分析判断线路开断对系统静态安全的影响程度。以江西电网实际电力系统为案例,通过仿真分析验证了所提辨识方法的合理性和有效性。

### 1 静态安全域分析

本节对静态安全域分析思想进行简要介绍,并对静态安全裕度的概念进行说明。

#### 1.1 静态安全域

电力系统正常运行时需要满足节点功率平衡、发电机出力范围和线路潮流范围等一系列约束<sup>[4]</sup>,这些约束共同构成了电力系统运行的静态安全域。电力系统的约束可分为两种类型:1) 可受电力系统直接控制的约束,如发电机的出力范围,本文称为运行约束;2) 不受电力系统直接控制且和电力系统

运行安全有关的约束,如线路潮流范围,本文称为安全约束。所有运行约束共同构成运行约束域 $\Omega_r$ ,所有安全约束共同构成安全约束域 $\Omega_s$ ,其交集即为静态安全域 $\Omega_c$ ,如图1所示。

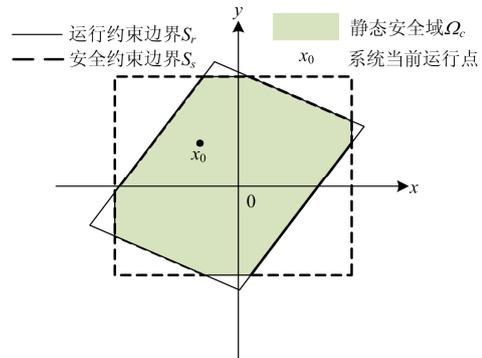


图1 静态安全域

Fig. 1 Steady-state security region

由图1可以看出,实线表示系统运行约束域的各个运行约束边界 $S_r$ ,虚线表示系统安全约束域的各个安全约束边界 $S_s$ 。阴影部分即表示系统正常运行时的静态安全域,其中系统当前运行点 $x_0$ 为静态安全域内的某一点。

#### 1.2 静态安全裕度

静态安全裕度 $D_s$ 定义为系统当前潮流运行点到静态安全域安全约束边界 $S_s$ 的最短距离<sup>[15]</sup>,如图2所示。

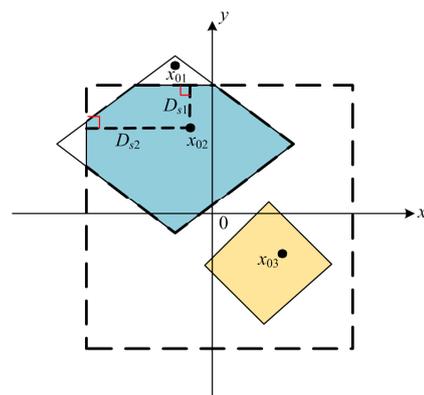


图2 静态安全裕度

Fig. 2 Steady-state security margin

考虑到静态安全域的边界是由各种约束构成,而运行约束是可受电力系统控制的,故静态安全裕度只需关注系统当前潮流运行点到各安全约束边界的最短距离的最小值,如式(1)所示。

$$D_s = \min \{D_{s1}, D_{s2}, \dots, D_{sn}\} \quad (1)$$

由图2可以看出,考虑到潮流运行点和静态安

全域之间的关系, 运行点到各安全边界的最短距离和静态安全裕度存在以下三种情况: 1) 潮流运行点  $x_{01}$  越过某一安全边界时, 静态安全裕度为 0; 2) 潮流运行点  $x_{02}$  在运行约束域和安全约束域的交集之内时, 静态安全裕度等于该点到各安全边界的最短距离的最小值; 3) 潮流运行点  $x_{03}$  在运行约束域内, 同时运行约束域是安全约束域的子集, 此时潮流运行点不会越过任意一条安全边界, 静态安全裕度为无穷大。

## 2 关键线路辨识模型

本节首先结合支路潮流模型, 给出交直流电力系统的静态安全域数学模型; 然后考虑交流线路潮流越限与直流逆变站闭锁判据, 给出交直流电力系统静态安全裕度的具体计算方法。

### 2.1 支路潮流模型

传统的直流潮流模型忽略了电力系统中的无功功率以及认为所有节点的电压均为 1 p.u.<sup>[11]</sup>, 降低了模型的准确性, 存在以下两个问题: 1) 在交直流混联电网中, 换流站注入交流系统的有功和无功功率具有一定的耦合关系, 不计无功会严重影响模型的准确性; 2) 所有节点电压相同, 不适用于交直流电网的建模。而支路潮流模型不存在上述问题, 且计算较为准确<sup>[16]</sup>, 因此选取支路潮流模型对交直流混联电网进行建模。

交直流混联电网的正常安全运行需满足等式约束和上下界约束。其中, 等式约束包括节点功率平衡关系约束(式(2)和式(3))、交流线路损耗关系约束(式(4)和式(5))、交流线路两端电压幅值关系约束和交流网络中每个独立回路的相角差关系约束(式(6)和式(7))、换流站功率耦合关系约束(式(8)), 以上所述约束的表达式为

$$P_{Gk} + P_{cvm} - \sum_{j=1}^{N_{LAC}} M_{PQAC}(i, j) P_{rACj} - \sum_{j=1}^{N_{LAC}} M_{LAC}(i, j) P_{lsACj} = P_{Li} - P_{cuti} \quad (2)$$

$$Q_{Gk} + Q_{cvm} + Q_{cvc} - \sum_{j=1}^{N_{LAC}} M_{PQAC}(i, j) Q_{rACj} - \sum_{j=1}^{N_{LAC}} M_{LAC}(i, j) Q_{lsACj} + B_{ii} W_{ACi} = Q_{Li} - Q_{cuti} \quad (3)$$

式中:  $P_{Gk}$  和  $Q_{Gk}$  分别为第  $k$  台发电机的有功出力和无功出力;  $P_{cvm}$ 、 $Q_{cvm}$  和  $Q_{cvc}$  分别为第  $m$  个换流站注入的有功功率、无功功率和无功补偿功率;  $P_{rACj}$  和  $Q_{rACj}$  分别为第  $j$  条线路受端传输的有功功率和无功功率;  $M_{PQAC}(i, j)$  和  $M_{LAC}(i, j)$  分别表示支路  $j$  规定正方向和节点  $i$  的关系<sup>[17]</sup>;  $P_{lsACj}$  和  $Q_{lsACj}$  分别为第

$j$  条线路的有功损耗和无功损耗;  $N_{LAC}$ 、 $B_{ii}$  和  $W_{ACi}$  分别为支路数、第  $i$  个节点对地总电纳和第  $i$  个节点的电压幅值平方;  $P_{Li}$  和  $Q_{Li}$  分别为第  $i$  个节点处所接有功负荷和无功负荷;  $P_{cuti}$  和  $Q_{cuti}$  分别为第  $i$  个节点处切除的有功负荷量和无功负荷量。

$$P_{lsACj} W_{rACj} \geq R_{LACj} (P_{rACj}^2 + Q_{rACj}^2) \quad (4)$$

$$Q_{lsACj} W_{rACj} \geq X_{LACj} (P_{rACj}^2 + Q_{rACj}^2) \quad (5)$$

式中:  $W_{rACj}$  为第  $j$  条线路受端节点电压幅值的平方;  $R_{LACj}$  和  $X_{LACj}$  分别为第  $j$  条线路的电阻和电抗。

$$2R_{LACj} P_{rACj} + 2X_{LACj} Q_{rACj} + R_{LACj} P_{lsACj} + X_{LACj} Q_{lsACj} - \sum_{i=1}^{N_{LAC}} M_{WAC}(j, i) W_{ACi} = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{k=1}^{N_c} C_{kj} X_{LACj} P_{rACj} - \sum_{k=1}^{N_c} C_{kj} R_{LACj} Q_{rACj} = 0 \quad (7)$$

$$Q_{cvm} = |P_{cvm} \tan \alpha| \quad (8)$$

式中:  $M_{WAC}(j, i)$  为  $M_{PQAC}(i, j)$  的转置矩阵;  $N_c$  为独立基本回路的个数; 基本回路矩阵元素  $C_{kj}$  表示支路  $j$  与回路  $k$  之间的关联性; 角度  $\alpha$  由实际运行情况决定, 取一固定值。

系统运行需要满足的上下界约束包括发电机有功出力和无功出力约束(式(9)和式(10))、可变负荷大小约束(式(11)和式(12))、线路容量约束(式(13))、交流节点电压幅值约束(式(14))、换流站容量约束(式(15)), 以上约束的表达式为

$$P_{Gk \min} \leq P_{Gk} \leq P_{Gk \max} \quad (9)$$

$$Q_{Gk \min} \leq Q_{Gk} \leq Q_{Gk \max} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{cuti} \leq P_{Li} \quad (11)$$

$$0 \leq Q_{cuti} \leq Q_{Li} \quad (12)$$

$$-f_{LACj} \leq P_{rACj} \leq f_{LACj} \quad (13)$$

$$V_{ACi \min} \leq W_{ACi} \leq V_{ACi \max} \quad (14)$$

$$P_{cvm}^2 + Q_{cvm}^2 \leq f_{cvm}^2 \quad (15)$$

式中:  $P_{Gk \max}$ 、 $P_{Gk \min}$  分别为第  $k$  台发电机的有功出力上下限;  $Q_{Gk \max}$ 、 $Q_{Gk \min}$  分别为第  $k$  台发电机的无功出力上下限;  $f_{LACj}$  为第  $j$  条线路容量的上限;  $V_{ACi \max}$ 、 $V_{ACi \min}$  分别为节点  $i$  的电压幅值上下限;  $f_{cvm}$  为 LCC 换流站的容量。

上述基于支路潮流模型构建的交直流电力系统静态安全域中, 运行约束有式(2)~式(12)和式(15), 安全约束有式(13)和式(14)。

### 2.2 交直流系统静态安全裕度计算

基于静态安全域思想的静态安全裕度指标能够辨识任一运行点下的电网关键线路<sup>[18]</sup>, 静态安全裕度计算的基础为计算潮流运行点到各安全边界的最短距离, 具体如下。

(1) 安全边界的选取

本文主要关注交流线路断线对潮流越限和直流逆变站闭锁这两类安全问题的影响, 如果交流线路潮流越限, 则会发生保护跳闸断线<sup>[19]</sup>; 而直流换相失败会导致直流闭锁<sup>[20]</sup>。目前换相失败判别方法主要有熄弧角判断法<sup>[21]</sup>和最小电压降落法<sup>[22]</sup>两种, 而换流母线电压跌落是导致直流系统换相失败的主要原因<sup>[23]</sup>。因此, 本文采用最小电压降落法来近似判断直流系统是否发生换相失败。

线路容量约束边界的数学模型为在上述静态安全域模型的基础上, 将式(13)中的任意一条不等式约束边界取等号, 即

$$P_{rACj} = \pm f_{LACj} \quad (16)$$

同理, 换流站交流侧换相失败电压阈值约束边界的数学模型为在上述静态安全域模型的基础上, 将逆变站电压设为换相失败电压下限, 即

$$W_{ACv_i} = \mu \quad (17)$$

式中:  $W_{ACv_i}$  为换流站节点电压幅值的平方;  $\mu$  为换流站节点的换相失败电压阈值。

参考文献[24]可求得雅中直流工程的换相失败电压阈值为 0.88 p.u., 即认为当换流站节点电压下降至 0.88 p.u.时, 雅中直流发生换相失败。

(2) 最短距离计算模型

求解系统当前运行点到各安全约束边界的最短距离的最小值即为静态安全裕度值  $D_s$ , 这可以构成一个优化问题。其目标函数为

$$D_s^2 = \min \sum_{k=1}^{N_{AC}} (P_{rACk} - P_{rACk0})^2 + \sum_{i=1}^m (W_{ACv_i} - W_{ACv_i0})^2 \quad (18)$$

式中:  $P_{rACk0}$  和  $W_{ACv_i0}$  分别为系统当前运行点线路  $k$  的有功潮流和换流站节点  $i$  的电压幅值平方;  $P_{rACk}$  和  $W_{ACv_i}$  分别为安全边界  $S_s$  上某临界运行点  $x_s$  的线路  $k$  的有功潮流和换流站节点  $i$  的电压幅值平方。优化问题的约束即为前述所有的运行约束、不等式安全约束和等式安全边界约束。该优化问题为二次约束二次规划问题, 可调用商业求解器 CPLEX 直

接求解。

3 关键线路辨识流程

通过计算各条线路开断后系统的静态安全裕度, 能够对比判断不同的线路开断对系统静态安全性的影响程度。静态安全裕度指标  $D_s$  越小, 表明该线路开断后对系统的静态安全性影响越大, 该线路对当前系统来说越关键。

交直流混联电网的关键线路辨识流程具体步骤如下。

(1) 读取交直流混联电网的数据, 包括交流节点数据、发电机数据、支路数据、联络线数据、换流站数据和直流线数据。

(2) 利用给定的网架结构和电网数据进行潮流计算, 得到各条线路的有功功率和无功功率以及各节点的电压幅值。

(3) 断开第  $i$  条线路, 采用广度优先遍历(Breadth First Search, BFS)算法检测断线后网络的连通性, 判断是否会形成孤岛; 若形成孤岛, 则转至步骤(4), 否则跳转至步骤(5)。

(4) 找出断线后系统存在的孤岛, 对各个孤岛采用支路潮流模型进行孤岛优化, 计算得到各条线路的有功潮流分布和换流站节点的电压幅值。

(5) 计算断线后系统的潮流分布, 得到各线路的有功潮流分布和换流站节点的电压幅值。

(6) 判断电网中是否有线路过载, 若有, 则将该线路断开后的静态安全裕度  $D_{si}$  置 0; 否则, 进行静态安全裕度计算, 得到断线后系统的静态安全裕度值  $D_{si}$ 。

(7)  $i=i+1$ , 返回至步骤(3), 遍历完所有线路。

(8) 对静态安全裕度  $D_{si}$  进行升序排列, 排在前面的线路即为系统的关键线路。

对于步骤(3), 如果断线后形成图 3 所示孤岛, 此时需要调整发电机出力 and 削减部分负荷使潮流重新分布达到新的平衡状态。

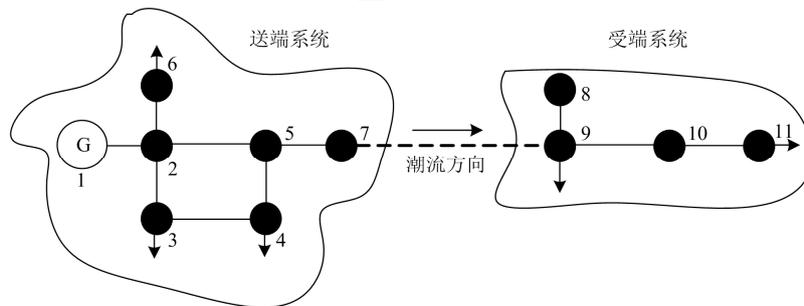


图 3 孤岛系统示意图

Fig. 3 Sketch diagram of island system





图 6 大负荷 3 000 万方式下关键线路辨识结果  
Fig. 6 Critical lines identification result under heavy load of 30 million



图 7 平负荷 2 100 万方式下关键线路辨识结果  
Fig. 7 Critical lines identification results under flat load of 21 million

西电网整体负荷水平较低，线路开断后系统潮流转移量相对较少，对系统的静态安全裕度影响较小。表 1 给出了两种运行方式下的关键线路排序、关键线路名称和静态安全裕度值。

表 1 江西电网不同负荷运行方式关键线路辨识结果  
Table 1 Identification result of critical lines at diverse load levels in Jiangxi Power Grid

| 排序 | 大负荷运行方式  |          | 平负荷运行方式  |          |
|----|----------|----------|----------|----------|
|    | 线路名称     | 安全裕度     | 线路名称     | 安全裕度     |
| 1  | 南昌-进贤 I  | 22.000 2 | 昌换-抚州    | 22.804 3 |
| 2  | 南昌-进贤 II | 22.219 2 | 南昌-进贤 I  | 23.059   |
| 3  | 赣州西-文山   | 24.717 8 | 南昌-进贤 II | 23.291 1 |
| 4  | 红都-南广    | 24.737   | 南昌-永修 I  | 24.901 5 |
| 5  | 昌特-昌换    | 26.776 5 | 南昌-永修 II | 27.735 7 |
| 6  | 永修-梦山    | 26.891 4 | 梦山-厚田    | 32.763 2 |
| 7  | 南昌-永修 I  | 27.382 4 | 永修-梦山 I  | 32.848 9 |
| 8  | 昌换-抚州    | 28.107 8 | 永修-梦山 II | 33.114 5 |
| 9  | 昌特-进贤    | 28.508   | 昌特-昌换    | 34.571 8 |
| 10 | 南昌-永修 II | 29.892 7 | 昌特-进贤    | 38.845 6 |

由表 1 可以看出，两种不同负荷运行方式下所辨识出的关键线路基本吻合，静态安全裕度较低的

线路大致集中分布在直流落点附近的线路(昌换-抚州、昌特-昌换)和鄂赣联络线节点附近的线路(昌特-进贤、南昌-永修、永修-梦山)。同时采用本文方法所辨识出的结果同电网工作人员进行的滚动校核分析研究一致，符合江西电网的实际运行情况，验证了本文所提交直流混联电网关键线路辨识方法的正确性。

### 4.3 结果分析

下面以江西电网大负荷 3 000 万运行方式为例，对所辨识到的前 10 条关键线路从网架结构和潮流转移的角度来分析其对电网的重要性和关键性。首先，表 2 和图 8 给出了江西电网有功负荷排序前 10 的 500 kV 节点数据。

表 2 江西电网有功负荷排名前 10 的 500 kV 节点  
Table 2 500 kV nodes of the ten most heavy active power load in Jiangxi Power Grid

| 节点名称 | 有功负荷/MW | 排序 |
|------|---------|----|
| 进贤站  | 1 415   | 1  |
| 赣州站  | 1 298   | 2  |
| 抚州站  | 1 131   | 3  |
| 红都站  | 1 061   | 4  |
| 信州站  | 1 050   | 5  |
| 梦山站  | 1 036   | 6  |
| 南昌站  | 999     | 7  |
| 石钟山站 | 985     | 8  |
| 厚田站  | 944     | 9  |
| 云峰站  | 916     | 10 |

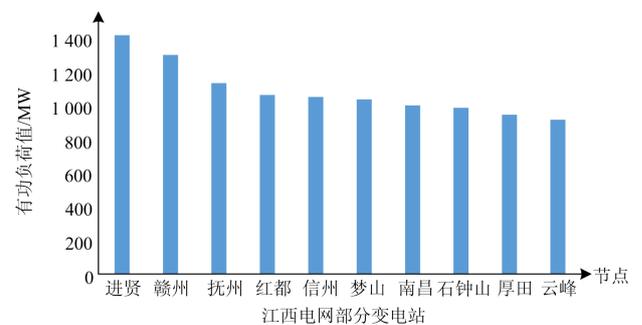


图 8 江西电网有功负荷排名前 10 的 500 kV 节点  
Fig. 8 500 kV nodes of the ten most heavy active power load in Jiangxi Power Grid

对比表 1 和表 2 可以看出，联络线节点附近的关键线路所连接的 500 kV 节点处有功负荷相对较重，说明断线后为保证相应节点负荷的正常供电，断开线路的潮流转移至另外一回线路上，导致另外一回线路负载率加重，系统静态安全裕度降低。而对于直流落点附近线路，由于直流功率大量馈入，线路本身潮流较重，断线后由于潮流转移导致近区

其他线路负载率加重, 系统静态安全裕度降低。

以红都-南广线和昌特-昌换线为例, 分析断线后系统的潮流转移情况和静态安全裕度。

红都-南广为单回线, 故障前由赣州-红都和南广-红都两回线路向红都站送电。当红都-南广单回线开断后, 为保证红都站处的负荷正常供电, 只能通过线路赣州-红都送电, 从而导致赣州-红都线路输送功率从 147 MW 增加到 1 075 MW, 引发较重的潮流转移, 线路负载率加重, 降低了系统的静态安全裕度。

昌特-昌换线属于雅中直流落点近区出线, 雅中直流向江西电网馈入大量有功功率, 当昌换-昌特一回出线开断后, 断开线路功率完全转移到另外两回出线上, 降低了其余两回线路的静态安全裕度, 加重了线路上的有功潮流。

以上内容针对江西电网 2021 年两种不同负荷规划运行方式下算例进行关键线路辨识, 所得辨识结果符合江西电网的实际运行情况, 并从网架结构和潮流转移的角度分析了该结果的合理性和有效性。

## 5 结论

特高压交直流混联电网运行特性的变化导致电力系统的薄弱环节发生改变。本文通过结合交直流混联电网的支路潮流模型, 利用静态安全域的分析思想, 提出一种基于静态安全域的交直流混联电网关键线路辨识方法。通过理论分析和仿真验证, 得到了以下结论。

1) 根据静态安全域分析思想, 综合考虑交流线路潮流越限与直流逆变电站闭锁判据, 能够定量计算每条线路开断后交直流电网的静态安全裕度, 找到系统中的关键线路。

2) 结合江西电网实际仿真算例, 结果表明所提关键线路辨识方法符合江西电网实际运行情况, 验证了该辨识方法的正确性和合理性。

3) 通过分析结果, 对辨识出的关键线路实施监控, 制定合理的安控措施, 可降低连锁故障的可能性, 对于电力系统的运行规划和预防交直流混联电网大停电事故具有重要的意义。

## 参考文献

[1] 易俊, 卜广全, 郭强, 等. 巴西“3·21”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 1-9.  
YI Jun, BU Guangquan, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Brazilian Power Grid on March 21, 2018 and its enlightenment to power grid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 1-9.

[2] 刘云. 巴西“9.13”远西北电网解列及停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(11): 3204-3213.  
LIU Yun. Analysis on and inspiration of the “9.13” islanding and outage of Brazilian Remote Northwest Power Grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(11): 3204-3213.

[3] 岳贤龙, 王涛, 顾雪平, 等. 基于自组织临界理论的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 18-26.  
YUE Xianlong, WANG Tao, GU Xueping, et al. Vulnerable line identification of power grid based on self-organizing critical theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 18-26.

[4] 李勇. 强直弱交区域互联大电网运行控制技术与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(12): 3756-3760.  
LI Yong. Technology and practice of the operation control of large power grid connected with weak AC area[J]. Power System Technology, 2016, 40(12): 3756-3760.

[5] 陈刚, 丁理杰, 李旻, 等. 异步联网后西南电网安全稳定特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 76-82.  
CHEN Gang, DING Lijie, LI Min, et al. Stability characteristics of southwest China power grid after asynchronous interconnection[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 76-82.

[6] 辛建波, 王玉麟, 舒展, 等. 特高压交直流接入对江西电网暂态稳定的影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 71-79.  
XIN Jianbo, WANG Yulin, SHU Zhan, et al. Transient stability impact analysis of UHV AV/DC access to Jiangxi power grid[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 71-79.

[7] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.  
LI Mingjie. Security and stability analysis method for AC/DC UHV power system cascading failure based on improved risk assessment[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.

[8] 何培颖, 房鑫炎. 基于连锁过载故障发生机理的关键线路辨识[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(8): 76-80.  
HE Peiying, FANG Xinyan. Identification of critical lines based on the developing mechanism of cascading overload fault[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(8): 76-80.

[9] 王仁伟, 张友刚, 杨阳, 等. 基于电气介数的复杂电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 1-6.  
WANG Renwei, ZHANG Yougang, YANG Yang, et al. Vulnerable line identification of complex power grid based on electrical betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 1-6.

[10] 王涛, 高成彬, 顾雪平, 等. 基于事故链模型的电网关

键线路辨识[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2306-2313.  
WANG Tao, GAO Chengbin, GU Xueping, et al. Critical lines identification of power grid based on the fault chain model[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2306-2313.

[11] 曾凯文, 文劲宇, 程时杰, 等. 复杂电网连锁故障下的关键线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1103-1112.  
ZENG Kaiwen, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Critical line identification of complex power system in cascading failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1103-1112.

[12] 曾磊磊, 杨琦, 曾鑫. 交直流混联电网的关键脆弱线路辨别[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(7): 106-111.  
ZENG Leilei, YANG Qi, ZENG Xin. Identification of key vulnerable lines in AC/DC hybrid power grid[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2016, 28(7): 106-111.

[13] 傅裕斌, 葛梦昕, 樊友平, 等. 基于节点流量重要度的电网关键节点辨识[J]. 现代电力, 2018, 35(3): 1-8.  
FU Yubin, GE Mengxin, FAN Youping, et al. Identification of critical nodes in power grid based on node traffic importance degree[J]. Modern Electric Power, 2018, 35(3): 1-8.

[14] 周博, 宋明刚, 黄佳伟, 等. 应对区域供电线路故障的多功能复合储能优化配置方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 25-34.  
ZHOU Bo, SONG Minggang, HUANG Jiawei, et al. Configuration optimization method of multifunctional hybrid energy storage for regional power line fault[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 25-34.

[15] 吴英俊. 一种基于超平面的电力系统实用近似静态安全域及其求解方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(增刊1): 374-383.  
WU Yingjun. Nonlinear speed control for a permanent magnet synchronous generator and the boost-chopper converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(S1): 374-383.

[16] 刘斌, 刘锋, 梅生伟, 等. 基于二阶锥优化的含有载调压变压器主动配电网最优潮流[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(19): 40-47.  
LIU Bin, LIU Feng, MEI Shengwei, et al. Optimal power flow in active distribution networks with on-load tap changer based on second-order cone programming[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 40-47.

[17] BARADAR M, HESAMZADEH M R, GHANDHARI M. Second-order cone programming for optimal power flow in VSC-type AC-DC grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(4): 4282-4291.

[18] 陈思捷, 陈启鑫, 夏清. 静态安全距离: 概念, 模型和意义[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 600-608.  
CHEN Sijie, CHEN Qixin, XIA Qing. Steady-state security distance: concept, model and meaning[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 600-608.

[19] 郭小敏, 黄俊, 杨健维, 等. 潮流介数理论在输电网断线风险评估中的应用[J]. 电网技术, 2015, 39(2): 486-493.  
GUO Xiaomin, HUANG Jun, YANG Jianwei, et al. Application of power betweenness theory in assessment on line-breakage risk in transmission network[J]. Power System Technology, 2015, 39(2): 486-493.

[20] 刘磊, 林圣, 何正友, 等. 基于虚拟换相面积缺乏量的HVDC系统连续换相失败抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(18): 5361-5368.  
LIU Lei, LIN Sheng, HE Zhengyou, et al. A novel method based on virtual commutation area insufficient to mitigate the continuous commutation failure for HVDC[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5361-5368.

[21] 何朝荣, 李兴源, 金小明, 等. 高压直流输电系统换相失败的判断标准[J]. 电网技术, 2006, 30(22): 19-23, 58.  
HE Chaorong, LI Xingyuan, JIN Xiaoming, et al. Criteria for commutation failure in HVDC transmission system[J]. Power System Technology, 2006, 30(22): 19-23, 58.

[22] ZHOU Y Z, WU H, WEI W, et al. Optimal allocation of dynamic var sources for reducing the probability of commutation failure occurrence in the receiving-end systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 324-333.

[23] 邵瑶, 汤涌, 郭小江, 等. 2015年特高压规划电网华北和华东地区多馈入直流输电系统的换相失败分析[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 9-15.  
SHAO Yao, TANG Yong, GUO Xiaojiang, et al. Analysis on commutation failures in multi-infeed HVDC transmission systems in North China and East China Power Grids Planned for UHV Power Grids in 2015[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 9-15.

[24] 李文博, 朱元振, 刘玉田. 交直流混联系统连锁故障搜索模型及故障关联分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(22): 59-72.  
LI Wenbo, ZHU Yuanzhen, LIU Yutian. Design of system protection scheme for North China Multi-UHV AC and DC strong coupling large receiving-end power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(22): 59-72.

收稿日期: 2019-05-19; 修回日期: 2019-08-15

作者简介:

辛建波(1970—), 男, 博士, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: mandyzhuhai@163.com

杨程祥(1996—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为交直流混联电网稳定性分析与控制; E-mail: chengxiangyang1234@163.com

姚伟(1983—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为交直流电力系统的稳定性分析与控制、新能源电力系统的稳定性分析与控制。E-mail: w.yao@hust.edu.cn

(编辑 许威)