

DOI: 10.7667/PSPC151614

# 一种与直流暂态稳定强相关的交流断面识别方法

霍超<sup>1</sup>, 崔晓丹<sup>2</sup>, 牛拴保<sup>1</sup>, 张红丽<sup>2</sup>, 柯贤波<sup>1</sup>, 李威<sup>2</sup>, 李碧君<sup>2</sup>, 常海军<sup>2</sup>, 周霞<sup>2</sup>

(1. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710000; 2. 南瑞集团公司, 江苏 南京 211106)

**摘要:** 随着投运直流的不断增多, 电力系统中交直流系统间的耦合程度越加紧密, 相互影响更加密切。量化评估直流与交流多断面间的暂态稳定耦合程度, 进而实现自动搜索识别与直流暂态稳定强相关的交流断面对于提高电力系统安全稳定协调优化控制和在线辅助决策水平都具有重要意义。基于 EEAC 理论, 分析了直流与交流输电断面暂态稳定耦合的机理, 通过计算直流不同功率扰动下的系统不同分群下各映象的暂态稳定裕度, 并拟合直流扰动功率下交流断面的暂态稳定裕度曲线, 从而量化评估直流与交流断面间的暂态稳定耦合程度。该方法可同时识别多个交流输电断面与多条直流暂态稳定耦合相关性。通过实际电网的算例验证方法的有效性。

**关键词:** 直流; 输电断面; 暂态稳定; 耦合; 最小二乘法拟合

## A quantitative assessment method for degree of transient stability coupling of DC and AC transmission sections

HUO Chao<sup>1</sup>, CUI Xiaodan<sup>2</sup>, NIU Shuanbao<sup>1</sup>, ZHANG Hongli<sup>2</sup>, KE Xianbo<sup>1</sup>, LI Wei<sup>2</sup>, LI Bijun<sup>2</sup>, CHANG Haijun<sup>2</sup>, ZHOU Xia<sup>2</sup>

(1. Northwest China Power System Dispatching & Control Branch Center, Xi'an 710000, China;

2. NARI Group Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** Along with increasing operation of DC, the coupling degree between DC and AC power systems is more tightly and the influence with each other is more closely. It has great significance on improving the level of coordinated optimization control of power system security and stability and online auxiliary decision-making for evaluating the degree of transient stability coupling between DC and AC transmission sections quantitatively, and then searching automatically and identifying the more closely related AC transmission sections with the transient stability coupling between DC and AC transmission sections. The transient stability coupling mechanism between DC and AC transmission sections is revealed by the theory of Extended Equal Area Criterion. On this basis, the matrix of transient stability margin of the dominant generators image of AC transmission sections is established through different DC power disturbances, and then the curves can be fitted with least square method. The curve slopes reflect quantitatively the transient stability coupling between DC and AC transmission sections. Finally, the example demonstrates the effectiveness of the method.

**Key words:** DC; AC transmission sections; transient stability; coupling; least square method fitting

## 0 引言

“西电东送、南北互供、全国联网”是我国电力系统发展的重要战略, 预计到 2020 年可形成覆盖全国统一调度的交直流运行的大系统, 使得电力系统的稳定问题更加复杂, 在不可预见重大事故下

给系统带来的经济损失也可能大幅度增加, 同时也给传统稳定分析与控制带来极大挑战<sup>[1-3]</sup>。防止电力系统崩溃瓦解, 进而防止大面积停电事故的发生, 是电力系统运行部门最重要的职责之一。

随着系统规模的扩大, 从混联电网结构上看, 存在围绕大型能源基地和负荷中心形成的直流送出和馈入系统、联合外送或受入的交直流并联和并列输电系统, 动态过程中交直流系统的相互影响可能会增强, 原本电气联系并不紧密的交流输电断面间的稳定问题也可能与直流相互耦合<sup>[4-5]</sup>。在交直流混合系统中, 直流系统与交流系统的耦合主要表现

---

**基金项目:** 国家电网公司科技项目“基于稳定性量化分析的大电网多断面暂态稳定交互影响及协调控制技术研究”、国家电网公司西北分部科技项目“大规模新能源集中接入方式下特高压直流弱送端电网安全稳定协调控制技术研究”

为交直流电气量的变化对系统的影响,一方面,同一直流故障下不同交流输电断面功率水平或网架结构下可能导致不同的失稳模式,扰动激发不平衡能量加剧叠加在交流断面使系统呈现某一失稳现象<sup>[6-7]</sup>;另一方面直流参与交流扰动的稳定控制,将改变交流系统有功转移分布及局部无功平衡特性,针对某一失稳模式的控制措施对其他失稳模式可能失效甚至带来危险的控制负效应问题,极端状况甚至会激发其他模式的相继失稳<sup>[8-10]</sup>。交直流耦合效应使混联电网扰动过程复杂化,如果没有整体的协调考虑,仅通过直观判断交流系统失稳模式的控制手段有时可能难以满足系统全局稳定问题的整体解决,即便能解决,方案也存在优化问题。

研究表明,已发生的直流闭锁、直流再启动、直流多次或连续换相失败、直流功率速降等诸多事故均与系统暂态失稳相关或因其而引发其他问题<sup>[11-12]</sup>,且事后分析表明,很多连锁故障和随后大停电事故的发生,都是因对电网动态过程中发展机理的了解不足,并缺乏相应的应对措施所致。而该过程中最重要的问题之一便是,缺乏对大电网内交直流稳定问题相关联关键输电断面的识别技术。为此,亟待加强电网运行中与直流暂态稳定强相关交流输电断面的识别,以提升电网输电能力和稳定运行水平。文献[13]提出了强相关交流断面识别方法及其关联程度指标。与直流暂态稳定强相关的交流断面的识别方法还未见相关报道,本文借鉴了文献[13]开展了这方面的研究。

由于在理论和工程方面缺乏直流与交流断面暂态稳定耦合量化评估方法,而电网安全稳定特性的复杂化,使得人工经验难以满足分析计算自动化和运行监控智能化的要求。因此需要一种能根据电网典型的运行方式或实测交直流当前运行工况和直流预想故障场景下,量化评估交直流输送水平交互影响的方法,以及自动对多个交流输电耦合程度排序。本文采用扩展等面积准则(EEAC)<sup>[14]</sup>,通过直流典型扰动下的时域仿真结果,进行指定发电机分群模式的系统映像下的暂态稳定裕度计算,拟合不同输电断面的暂态稳定裕度随直流功率扰动大小变化规律,识别交直流电网中直流与多输电断面暂态稳定的关联关系,为暂态稳定交直流协调控制提供技术基础。

## 1 交直流输电断面暂态稳定耦合特性

### 1.1 不同交流断面主导的系统稳定裕度随直流扰动大小的变化关系

设系统有  $K$  个交流输电断面,每个断面对应

一个用于计算其功率极限的直流预想故障,将限制断面  $i$  输送能力的预想故障记为断面  $i$  的关键故障  $C_i$  (例如直流功率不同程度速降、提升或直流闭锁故障)。将交流断面  $i$  在直流发生预想故障  $C_i$  时,表征断面  $i$  为割集断面的发电机分群模式下系统该映像的暂态稳定裕度  $\eta_i$ 。在本文中,该稳定裕度采用基于 EEAC 方法计算的轨迹稳定裕度<sup>[9]</sup>。

断面  $i$  主导的系统稳定裕度与断面  $i$  两侧发电机组电磁功率、机械功率及机组惯量有关。直流一般位于以断面  $i$  为分界的送端或受端系统,并且分为受入直流或送出直流输电系统。随着直流扰动的加剧,系统动态过程呈现不同变化,以断面  $i$  主导的系统稳定裕度单调变化,不同交流断面为割集的系统加速能量和减速能量各不相同。

当电网发生直流关键故障  $C_i$ ,断面  $i$  主导的系统稳定性达到临界稳定,该断面主导的系统稳定裕度  $\eta_i$  的数值为 0。

### 1.2 交直流暂态稳定相互耦合定性分析

如图 1 所示的电力系统有  $n$  台发电机,断面 1 和断面 2 是系统的两个交流输电断面,  $P_1$ 、 $P_2$  分别为两个断面的稳态传输功率,区域内存在直流受入或送出线路。

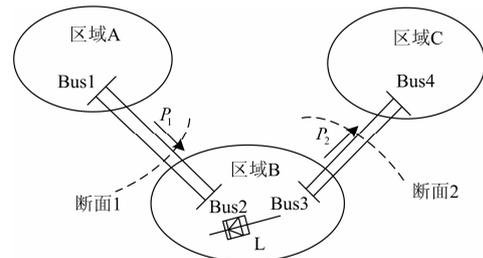


图 1 输电断面耦合分析示意图

Fig. 1 Sketch map of limitation coupling analysis of two interfaces in a power system

图 1 中系统各发电机的运动方程可以表示为

$$M_k \ddot{\delta}_k = P_{mk}(t) - P_{ek}(t) \quad (1)$$

式中:  $M_k$ 、 $\delta_k$ 、 $P_{mk}$  和  $P_{ek}$  分别为机组  $k$  的惯量、功角、原动机功率和电功率。

假设断面 1 的直流关键故障  $C_1$  下,将系统轨迹划分为两个互补群  $S$  群和  $A$  群(简称为“稳定模式  $\chi_1$ ”),基于 EEAC 理论,等值单机系统的映像为

$$\ddot{\delta} = \ddot{\delta}_s - \ddot{\delta}_a = \frac{P_{ms} - P_{es}}{M_s} - \frac{P_{ma} - P_{ea}}{M_a} = \left(\frac{P_{ms}}{M_s} - \frac{P_{ma}}{M_a}\right) - \left(\frac{P_{es}}{M_s} - \frac{P_{ea}}{M_a}\right) = P_m - P_e \quad (2)$$

式中:  $P_m = P_{ms} / M_s - P_{ma} / M_a$ , 为等值机械功率;

$P_e = P_{es} / M_s - P_{ea} / M_a$ , 为等值电磁功率。

断面 1 的主导的系统稳定裕度  $\eta_1$  即该等值映像的稳定裕度。

$$\eta_1 = \int_{\delta_0}^{\delta} (P_e - P_m) d\delta \quad (3)$$

式中: 对失稳轨迹  $\delta$  取为实际轨迹动态鞍点  $\delta_{\text{VDSP}}$ ; 对稳定轨迹  $\delta$  取虚拟的动态鞍点  $\delta_{\text{VDSP}}$ 。

直流线路输电功率的变化对以断面  $i$  主导的系统造成的影响类似于切机或切负荷。假设系统领前群存在一条外送功率的直流, 则该直流功率回降, 相当于在领前群中切除了负荷, 即减小了式(2)中的  $P_{es}$ , 等效于减小了单机系统的电磁功率, 增大了单机系统的加速面积, 不利于系统首摆的暂态稳定性; 假设系统余下存在一条外送功率的直流, 则回降该直流功率, 相当于在余下群中切除了负荷, 即减小了式(2)中的  $P_{ea}$ , 等效于增加了单机系统的电磁功率, 从而减小了单机系统的加速面积, 有利于系统首摆暂态稳定性。因此, 交流断面主导的系统稳定裕度与直流故障  $C_L$  下整个动态过程的  $P_m$ 、 $P_e$  以及积分上下限密切相关, 直流功率的改变影响, 影响到整个动态过程中  $P_m$ 、 $P_e$  的变化轨迹以及积分上限  $\delta$  的数值, 进而影响  $\eta_1$  的大小。

### 1.3 直流暂态过程对交流断面影响程度的量化表达

为进行直流对交流断面输电暂态交互影响的量化分析, 假设当直流输电功率扰动较小时, 即在直流输电断面功率空间的当前邻域内, 直流输送功率的变化对各交流断面主导的系统稳定裕度变化的影响方向和程度近似不变, 用如下线性关系描述。

$$\Delta\eta = J\Delta P \quad (4)$$

式中:  $\Delta P = \text{diag}[\Delta P_1, \Delta P_2, \dots, \Delta P_K]$ ,  $\Delta P_i$  为各直流输电线路在预想事故下功率变化大小;  $J$  为直流输送功率变化对各交流断面主导的系统稳定裕度影响的交互影响因子矩阵。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial \eta_1}{\partial P_1} & \frac{\partial \eta_1}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial \eta_1}{\partial P_K} \\ \frac{\partial \eta_2}{\partial P_1} & \frac{\partial \eta_2}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial \eta_2}{\partial P_K} \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ \frac{\partial \eta_T}{\partial P_1} & \frac{\partial \eta_T}{\partial P_2} & \dots & \frac{\partial \eta_T}{\partial P_K} \end{bmatrix}$$

其中,  $\frac{\partial \eta_j}{\partial P_i}$  反映了直流线路  $i$  ( $i=1 \sim K$ ) 输电功率变化对断面  $j$  ( $j=1 \sim T$ ) 主导的等值单机无穷大系统稳定裕度的影响程度。由于直流与不同断面暂态稳

定极限存在耦合, 因此  $\frac{\partial \eta_j}{\partial P_i}$  数值一般不为零。

式(4)中  $\Delta\eta$  为各断面主导的系统稳定裕度变化量矩阵。其中, 矩阵元素  $\Delta\eta_j(i)$  表示直流线路  $i$  输电功率变化  $\Delta P_i$  引起交流断面  $j$  主导的等值单机无穷大系统稳定裕度变化量。

需要说明的是, 不同直流输电线路预想故障下直流功率变化的幅度及衍变速度可不同, 即交互影响因子矩阵各列相互独立。从交直流交互影响因子矩阵不仅可得出不同交流断面与直流暂态耦合关系强弱, 还可以得出某一交流断面与若干直流的暂态耦合程度。

## 2 与直流暂态稳定耦合的多个输电断面识别方法

与直流暂态稳定极限耦合的多个输电断面识别方法的总体思路是: 根据交直流电网的典型运行方式或当前运行工况、模型及参数和输电断面集合, 基于直流典型扰动下暂态稳定时域仿真结果, 计算不同程度直流扰动下以交流断面为割集断面的发电机分群模式下系统该映像的暂态稳定裕度指标, 进一步拟合系统指定映像的暂态稳定裕度指标随直流扰动大小变化规律, 识别与指定直流暂态稳定强相关的交流断面及强相关性质。该方法可同时识别交流输电断面与多条直流暂态稳定相关性, 为后续制定整体的协调控制策略提供基础。

为了解决系统强非线性和时变性对算法收敛性的影响, 将系统直流功率的调节过程分为若干步, 每步调节的直流功率控制在一定范围, 并通过迭代直至所有交流断面的主导稳定裕度达到曲线拟合可接受程度为止。迭代过程中以各交流断面分群的系统稳定裕度均会重新计算。

### 2.1 数学模型

大量实践经验表明, 某交流断面主导的系统稳定裕度随直流扰动程度的变化呈单调正比或反比关系, 通过变化的速度可识别与直流暂态稳定耦合的强度, 即直流输送有功功率相同扰动下, 交流断面传输的有功功率变化越快, 稳定裕度越容易逼近临界稳定。如何在定量描述系统直流扰动过程中使系统主要关键断面主导的系统稳定性趋向临界稳定的快慢, 从而判断对直流暂态稳定最灵敏的交流断面, 对于提高断面搜索的计算效率, 具有较大的现实意义。该问题的数学模型可描述如下。

$$\begin{aligned} & \max |K| \\ \text{s.t.1} \quad & \Delta\eta = \mathbf{J}\Delta P \\ \text{s.t.2} \quad & \min \sum_{i=1}^j (\varphi(\Delta P) - \Delta\eta)^2 \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $\Delta P_1 \sim P_k$  为各个直流断面的输电功率变化量，是控制变量； $\eta_i$  为断面  $i$  主导的系统稳定裕度； $\mathbf{J}$  为交直流交互影响因子矩阵； $\varphi(\Delta P)$  为由  $\{\Delta P, \Delta\eta\}$  组成序列的最小二乘法拟合曲线； $K$  为拟合曲线斜率。

因此，与直流暂态稳定强耦合的交流断面识别等效为：判断  $K_{S_i}$  的绝对值是否大于设定门限值。如果是，则  $S_i$  和所研究直流线路  $L$  暂态稳定强相关，并且  $K_{S_i}$  的绝对值越大，则该交流断面与直流线路  $L$  暂态稳定关联性越强；否则  $S_i$  和直流线路  $L$  不是强相关。对于与直流输电线路  $L$  暂态稳定强相关的交流断面  $S_j$ ，判断其强相关的性质：若  $K_{S_j} > 0$ ，则认为  $S_j$  与  $L$  正强相关，若  $K_{S_j} < 0$ ，则认为  $S_j$  与  $L$  负强相关。

由于电力系统存在强非线性和时变性，通过数学解析方法或者直接用数学规划算法求解上述问题相当困难。为此，本文基于上述交互影响因子矩阵进行仿真迭代计算。

### 2.2 交互影响因子矩阵的求取

以当前运行工况逐次增加直流扰动功率，直流线路典型扰动包括以下 3 类：直流紧急功率逐档提升至最大档位(从当前运行档位  $k$  提升至最大档位  $N$  共有  $N-k$  个扰动)；直流紧急功率逐档速降至最小档位(从当前运行档位  $k$  速降至最小档位  $M$  共有  $k-M$  个扰动，一般情况下  $M=1$ )；直流线路闭锁故障。

根据直流线路在扰动下系统时域仿真结果，将所有发电机划分为以各交流断面  $S_i (i=1 \sim K)$  为割集的互补两群  $S$  群和  $A$  群(即断面  $S_i$  送端所有发电机组成  $S$  群，断面  $S_i$  受端所有发电机组成  $A$  群)，基于 EEAC 方法计算以  $S_i$  为割集断面的该分群模式下系统映像暂态稳定裕度  $\eta_i$ 。假设当各直流输电功率变化较小时，即在直流输电功率空间的当前邻域内，交流断面输送功率的变化对断面主导的系统稳定裕度变化的影响方向和程度近似不变，用公式(4)线性关系描述， $\frac{\partial \eta_i}{\partial P_i}$  比值即为交流与直流交互影响因子。

### 2.3 算法流程

1) 获取电网典型方式数据，确定要考察暂态稳定相关性的直流线路、交流断面集合；获取直

流线路运行档位数，当前典型方式下的运行功率  $P_{L0}$  及运行档位  $k$ ，直流每档的功率变化量  $\Delta P_L$ ；

2) 确定直流线路的典型扰动，设直流线路  $L$  的典型扰动数为  $T$ ，针对这  $T$  个典型扰动分别进行系统暂态稳定时域仿真；

3) 针对直流线路典型扰动下的暂态稳定时域仿真结果，分别计算直流线路的各典型扰动  $L_j$  下，以  $S_i$  为割集断面的发电机分群模式下系统该映像的暂态稳定裕度指标，记为  $F_{L_j \rightarrow S_i}$ 。

4) 以直流扰动  $L_j$  下直流有功功率扰动大小  $\Delta P_L$  为横坐标，以  $F_{L_j \rightarrow S_i}$  为纵坐标，在二维坐标轴上绘制点列  $\{(\Delta P_L, F_{L_j \rightarrow S_i})\}$ ；利用最小二乘法对点序列进行线性拟合，记线性拟合后直线的斜率为  $K_{S_i}$ 。

5) 判断  $K_{S_i}$  的绝对值是否大于设定门限值。如果是，则  $S_i$  和直流线路  $L$  暂态稳定强相关。

## 3 算例分析

某实际系统规划 750 kV 网架示意图如图 2 所示，所考察交流输电断面为断面 1DUYU 断面(DUHU-QIWA 双回+YUKA-CADA 双回)、断面 2QUYU 断面(JIQU-HEXI 双回+YUKA-CADA 双回)、断面 3HEYU 断面(HEXI-WUSH 双回+YUKA-CADA 双回)；所考察直流输电线路为 D1 直流、D2 直流。

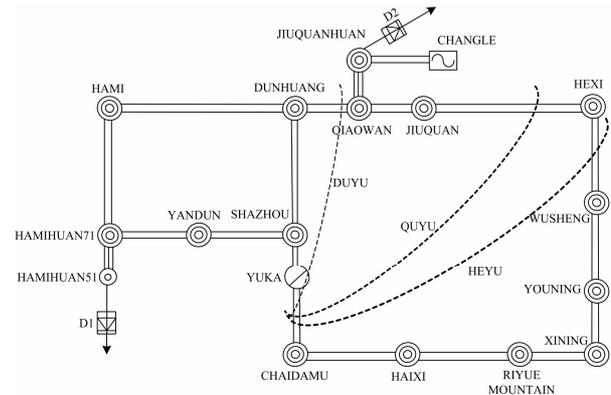


图 2 算例系统结构示意图

Fig. 2 Structure of test power system

设置直流 D1 关键故障  $C_1$  为：直流功率速降 5 000 MW、6 000 MW、7 000 MW；直流 D2 关键故障  $C_2$  为：直流功率速降 5 000 MW、6 000 MW、7 000 MW。直流速降的速率均为 5 000 MW/s，按照实际工程经验  $K_{S_i}$  门限值取为 0.01。

研究电网联网通道交流断面与送出直流耦合紧密, 直流功率速降甚至闭锁故障后功率转移至相邻断面, 严重情况可导致断面功率振荡, 突破静稳极限而使发电机组功角失稳、沿线母线电压失稳等。为保证系统暂态稳定性, 需分别求取与直流 D1、直流 D2 耦合最紧密的交流断面, 两条直流均位于联网通道外送断面的临界群, 直流功率速降相当于在领先群中切除了负荷, 等效于减小了单机系统的电磁功率, 增大了单机系统的加速面积, 不利于系统首摆的暂态稳定性, 各交流断面主导的系统稳定裕度降低, 与直流不同耦合程度的交流断面降低的速度也不同。借助 EEAC 仿真工具, 按照上文中的耦合程度计算方法进行多断面交直流暂态稳定仿真。

表 1 迭代过程的中间数据

Table 1 Key data of every iteration

步数	直流 D1 $\Delta P$ /MW	$\eta_1$ (%)	$\eta_2$ (%)	$\eta_3$ (%)
1	5 000	92.15	91.25	93.11
2	6 000	79.27	77.14	81.84
3	7 000	71.55	64.91	71.39

步数	直流 D2 $\Delta P$ /MW	$\eta_1$ (%)	$\eta_2$ (%)	$\eta_3$ (%)
1	5 000	93.78	92.70	95.52
2	6 000	98.94	88.46	90.44
3	7 000	100	71.70	85.56

由表 1 对各直流扰动下交流断面主导的系统稳定裕度进行描点可得图 3。

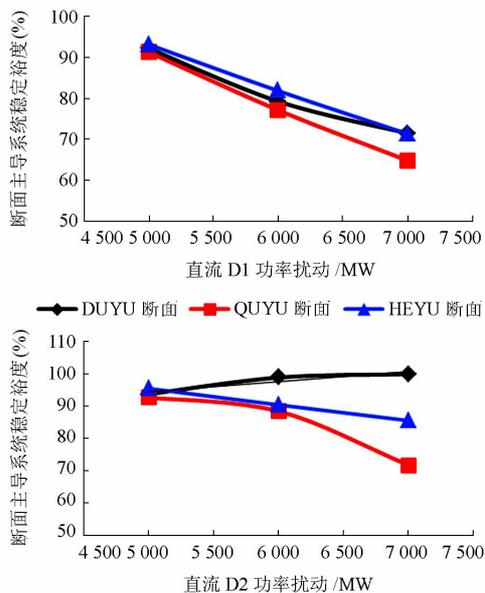


图 3 直流不同程度扰动下交流断面主导的系统稳定裕度

Fig. 3 Interface power and corresponding stability margin of every iteration

将图 3 中直流 D1 和 D2 扰动下交流断面稳定裕度曲线按照式(4)进行最小二乘法曲线拟合, 得到交直流交互因子矩阵为

$$J = \begin{bmatrix} -0.0103 & 0.0031 \\ -0.0132 & -0.0105 \\ -0.0109 & -0.005 \end{bmatrix}$$

直流 D1 扰动下 DUYU 断面、QUYU 断面、HEYU 断面拟合曲线斜率  $|K|$  分别为 0.010 3、0.013 2、0.010 9。由交直流耦合数学模型公式(5)可知, 拟合曲线斜率最大为 0.013 2, 对直流 D1 暂态稳定最灵敏的交流断面为 QUYU 断面。

直流 D2 扰动下 DUYU 断面、QUYU 断面、HEYU 断面拟合曲线斜率  $|K|$  分别为 0.003 1、0.010 5、0.005。拟合曲线斜率最大为 0.010 5, 对直流 D2 暂态稳定最灵敏的交流断面为 QUYU 断面。

由矩阵  $J$  计算结果可知, 第一列为直流 D1 扰动下断面 1~3 稳定裕度拟合曲线斜率, 其绝对值均大于阈值, 与直流 D1 耦合程度排序依次: QUYU 断面>HEYU 断面>DUYU 断面, 三种交流断面稳定裕度均与直流 D1 负相关, 即直流冲击功率越大, 交流断面主导的系统稳定裕度越小; 第二列为直流 D2 扰动下断面 1~3 稳定裕度拟合曲线斜率, 其绝对值只有 QUYU 断面大于阈值, QUYU 断面、HEYU 断面稳定裕度均与直流 D1 负相关, 即直流冲击功率越大, 交流断面主导的系统稳定裕度越小; 而 DUYU 断面稳定裕度与直流 D2 正相关, 这是由于直流 D2 位于以 DUYU 断面为割集的余下群, 直流功率下降则等值单机无穷大系统电磁功率增加, 减速面积增大, 有利于系统稳定。

由表 1 对比同一交流断面对不同直流扰动的响应可知, 各交流断面与直流 D1 耦合更为紧密, 这可通过直流闭锁后功率转移比计算解释: 直流 D1 闭锁后盈余功率转移至联网一通道 (DUHU-QIWA-JIQU-HEXI-WUSH) 功率约占网内盈余功率的 60%, 二通道约 40%; 而直流 D2 闭锁后转移至联网一通道功率约占网内盈余功率的 40%, 二通道约 60%, 各交流断面主导的系统稳定裕度受一通道近区机组功角特性影响更大, 故交流断面与直流 D1 耦合程度更强。

综合上述研究结果可知, QUYU 断面对近区两大直流功率变化更为灵敏, 与直流暂态过程耦合更为紧密, 对直流 D1 的交互影响因子为 -0.013 2, 对直流 D2 的交互影响因子为 -0.010 5。运行中制

定交直流协调控制策略时更应考虑与 QUYU 断面的协调。

## 4 结论

(1) 本文提出的与直流暂态稳定强相关的交流断面识别方法能够计算直流不同扰动程度下以各交流断面为割集的机组分群模式下等值映像的稳定裕度及其衍变规律。

(2) 提出的交直流交互影响指标能有效地区分不同交流断面、不同直流的耦合紧密程度及耦合性质等,从而为调度控制人员进行调控决策提供依据。

(3) 该方法不受系统网架和运行方式限制,可通过工程需要灵活改变门槛值大小,计算量较小,通过简单迭代即可求解,便于后续自动化过程实现。

(4) 在多直流复杂电网中的实例验证了算法有效性,可进行多直流系统关键断面识别推广。

## 参考文献

- [1] 舒印彪, 张文亮, 周孝信, 等. 特高压同步电网安全性评估[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(34): 1-6.  
SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, et al. Security evaluation of UHV synchronized power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(34): 1-6.
- [2] 程丽敏, 李兴源. 多区域交直流互联系统的频率稳定控制[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 56-62.  
CHENG Limin, LI Xingyuan. Load frequency control in multi-area AC/DC interconnected power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 56-62.
- [3] 于洋, 孙学锋, 高鹏, 等. 高压直流输电线路暂态保护分析与展望[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(2): 148-154.  
YU Yang, SUN Xuefeng, GAO Peng, et al. Analysis and prospect on transient protection for HVDC transmission lines[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(2): 148-154.
- [4] 余晓鹏, 张雪敏, 钟雨芯. 交直流系统连锁故障模型及停电风险分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 33-38.  
YU Xiaopeng, ZHANG Xuemin, ZHONG Yuxin. Cascading failure mode of AC-DC system and blackout risk analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 33-38.
- [5] SZECHTMAN M, WESS T, THIO C V. First benchmark model for HVDC control studies[J]. CIGRE WG 14.02, Electra, 1991(135): 54-73.
- [6] 陈水明, 余占清, 黄璐璐, 等. 互联系统电磁暂态交互作用研究, IV: 直流侧对交流侧的影响[J]. 高电压技术, 2011, 37(7): 1590-1597.  
CHEN Shuiming, YU Zhanqing, HUANG Lulu, et al. Transient interaction of HVAC and HVDC in converter station in HVDC, IV: effects of DC sides on AC sides[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(7): 1590-1597.
- [7] 胡艳梅, 吴俊勇, 李芳, 等.  $\pm 800$  kV 哈郑特高压直流控制方式对河南电网电压稳定性影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(21): 147-153.  
HU Yanmei, WU Junyong, LI Fang, et al. Impacts of DC system control mode for  $\pm 800$  kV Ha-Zheng UHVDC on voltage stability of Henan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(21): 147-153.
- [8] 黄志岭, 黄晓明, 陈炜, 等. 芦嵯直流无功优化方案仿真研究[J]. 高压电器, 2014, 50(6): 65-69.  
HUANG Zhiling, HUANG Xiaoming, CHEN Wei, et al. Simulation study on Lu-Sheng HVDC reactive power optimization scheme[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(6): 65-69.
- [9] 李兆伟, 任先成, 刘福锁, 等. 交直流并联电网中直流功率紧急控制影响及优化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 104-109.  
LI Zhaowei, REN Xiancheng, LIU Fusuo, et al. Research on effects and optimization of emergency DC power control in AC/DC hybrid power grid[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 104-109.
- [10] 李生福, 张爱玲, 李少华, 等. “风火打捆”交直流外送系统的暂态稳定控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(1): 108-114.  
LI Shengfu, ZHANG Ailing, LI Shaohua, et al. Study on transient stability control for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(1): 108-114.
- [11] 余海翔, 陈立, 梁家豪. 天广直流广州换流站换相失败机理探讨[J]. 高压电器, 2015, 51(3): 151-156.  
YU Haixiang, CHEN Li, LIANG Jiahao. Investigation of commutation failure in Guangzhou converter station of

- Tian-Guang HVDC Project[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(3): 151-156.
- [12] 陈虎, 张英敏, 贺洋, 等. 特高压交流对四川电网多送出直流输电系统影响评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 136-141.
- CHEN Hu, ZHANG Yingmin, HE Yang, et al. Impact assessment of UHVAC on multi-send HVDC systems of Sichuan power grid[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(7): 136-141.
- [13] 方勇杰, 崔晓丹, 王胜明, 等. 暂态稳定极限耦合的多个输电断面极限功率协调计算[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 53-57.
- FANG Yongjie, CUI Xiaodan, WANG Shengming, et al. Coordinated limit power calculation of multi-sections with transient stability limit coupling[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 53-57.
- [14] 鲍颜红, 徐泰山, 徐立雄, 等. 暂态稳定预防控制及极限功率集群计算[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 32-35.
- BAO Yanhong, XU Taishan, XU Lixiong, et al. Cluster computing mode for transient stability-constrained preventive control implementation and total transfer capability calculation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 32-35.
- 
- 收稿日期: 2015-09-09; 修回日期: 2015-11-09
- 作者简介:
- 霍超(1982-), 男, 硕士研究生, 工程师, 研究方向为电网安全稳定运行与控制;
- 崔晓丹(1981-), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为电力系统分析及控制研究;
- 张红丽(1989-), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统分析及控制研究。E-mail: zhanghongli@sgepri.sgcc.com.cn
- (编辑 周金梅)