

DOI: 10.7667/PSPC160349

## 链式电网动态稳定下多断面耦合特性研究

梁艳红<sup>1</sup>, 张文朝<sup>2</sup>, 李付强<sup>3</sup>, 盛四清<sup>1</sup>, 潘艳<sup>2</sup>, 胡娱欧<sup>3</sup>, 何忠华<sup>3</sup>, 李轶群<sup>3</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 南京南瑞集团北京监控技术中心, 北京 102200; 3. 国家电网公司华北分部, 北京 100053)

**摘要:** 子系统网架结构及内部潮流对互联系统动态稳定性能有一定影响。针对多断面间呈链式结构的电网, 为研究不同断面对系统稳定的影响差异性 & 断面间耦合特性, 提出了动态稳定下链式电网断面相对敏感度与耦合度的计算方法。根据断面潮流与两侧角度差的关系, 分析了断面潮流调整下互联系统送受端相对角度与扰动下振荡阻尼比的变化规律。对断面间耦合机理的研究表明, 断面敏感度与其等值联系电抗、两侧角度差及送端机群惯量等因素有关。三机系统及实际链式电网算例的分析结果验证了方法的有效性与可行性, 能够为实际电网动态稳定运行中断面潮流间的协调控制提供可靠依据。

**关键词:** 链式电网; 动态稳定性; 相对敏感度; 断面耦合; 送受端相对角度

### Research on multi-sections coupling characteristics of chain network dynamic stability

LIANG Yanhong<sup>1</sup>, ZHANG Wenchao<sup>2</sup>, LI Fuqiang<sup>3</sup>, SHENG Siqing<sup>1</sup>, PAN Yan<sup>2</sup>, HU Yuou<sup>3</sup>, HE Zhonghua<sup>3</sup>, LI Yiqun<sup>3</sup>

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;  
2. NARI Group Corporation Beijing Monitoring Technology Center, Beijing 102200, China;  
3. North Division of State Grid Corporation, Beijing 100053, China)

**Abstract:** The network structure and power flow of subsystem have some influence on the dynamic stability of interconnected power system. For power grid with multiple sections chain structure, a calculation method of relative sensitivity and mutual coupling degree between transmission sections in chain grid is proposed, in order to research the difference of effects of sections on power system stability and the coupled mechanism. The change law of system damping ratio after disturbance and relative angles between the delivery end and the receiving end of interconnected system, is analyzed, according to the relationship between interface power flow and angle difference at two terminals. It shows that there are several factors associating with the section sensitivity, such as equivalent reactance, the angle difference and inertia time constants of sending-end units. Based on the coupling relationship between transmission interfaces, it would be easy to coordinate interface power flow control in actual network, and it is proved effective and feasible by the results of three-machine system model and Mengxi chain network.

**Key words:** chain-structure system; dynamic stability; relative sensitivity; coupling of transmission interfaces; relative angle of delivery end and receiving end

## 0 引言

随着大区电网间互联规模的扩大, 互联电网中动态稳定问题成为影响电网稳定运行的重要因素<sup>[1]</sup>。国内外学者采用灵敏度分析<sup>[2]</sup>等方法研究表明, 除发电机控制系统外, 区域电网联络强度、系统网架结构、负荷特性等因素对系统动态稳定特性也有一定的影响。系统之间弱联系、发电机组经长线路接入系统以及长链状结构均可导致系统缺乏足够的振

荡阻尼, 国内外“长链型”互联电网如美、加电网和巴西电网及全国互联电网包括南方电网, 均曾出现过 0.1~1.0 Hz 的低频振荡<sup>[3]</sup>。

针对链式结构电网的稳定问题, 文献[4-5]分别研究福建链式电网与华东互联后的暂态稳定及低频振荡问题, 并提出了基于子区域网架强度及联络功率的抑制措施。文献[6]基于链式系统模型提出了采用机组输出反馈的附加稳定控制方法。针对电网中多断面耦合下的稳定问题, 文献[7]采用功率摄动法

量化各断面输电水平间的交互影响程度。文献[8]考虑到断面间耦合作用而在输电极限搜索过程中计算了关联断面极限功率影响因子。文献[9]针对多输电通道、多送区并存的组合断面极限问题,通过迭代计算确定不同送电区的功率增量比率,来区分不同送电区功率调整对静态安全性的影响差异。文献[10]根据边界超平面方程系数大小判断各断面潮流对系统稳定性的影响趋势。以上关于断面间相互作用的研究多为定性分析,而未对耦合机理充分研究。

本文基于链式电网断面潮流与两侧机群等值功角差的关系,根据断面功率调整下送受系统相对角度的变化,推导计算了系统动态稳定性对各断面潮流变化的敏感度并清晰呈现出各断面间的耦合关系,从而为断面间优化控制策略提供直观可靠的依据。

### 1 链式系统多断面耦合机理分析

电网动态特性与综合了电网结构、传输功率两因素的系统工作点有关,工作点位置受联络阻抗及送受端相对相位角变化的影响均较明显<sup>[11]</sup>。区域互联电网可等值为两机系统,如图1所示。

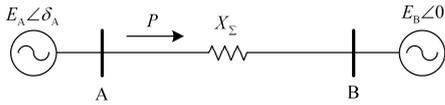


图1 互联系统等值示意图

Fig. 1 Interconnected system equating schematic diagram

互联系统交换功率  $P$  满足

$$P = \frac{E_A E_B}{X_L + X_{SA} + X_{SB}} \sin \delta_A \quad (1)$$

式中:  $X_L$  为互联电网等值联络电抗;  $X_{SA}, X_{SB}$  为A, B侧系统等值电抗;  $E_A, E_B$  为对应等值电动势;  $\delta_A$  为送端系统相对受端系统的等值角度(取受端系统B等值角度为参考)。根据两机互联系统机电振荡模式的阻尼随两机转子相对角大小变化而变化的一般规律<sup>[12]</sup>, 互联系统送受端机群角度差与系统阻尼密切相关, 角度差越大, 系统动态稳定性越差。在此基础上, 文献[13]通过控制两端机群的相对运动来改善系统阻尼, 文献[14]依据断面两侧关键机组的相对功角及变化轨迹判断系统动态稳定状态, 文献[15]分别求取两群相对振荡的机组振荡周期内振荡相角的均值, 判别相角均值大者为领前群, 通过提升领前群电压水平来影响两群发电机间转子角差, 从而增加振荡模式阻尼。

当弱互联系统联络断面受扰动导致两侧机群功角间发生相互振荡时, 将两机群间等值功角差作为分析系统动态稳定性的依据。送、受端机群分别记为A, B, 则A, B机群的等值角度  $\delta_A, \delta_B$  为

$$\begin{cases} \delta_A = (\sum_{i \in A} M_i \delta_i) / M_A \\ \delta_B = (\sum_{j \in B} M_j \delta_j) / M_B \\ M_A = \sum_{i \in A} M_i \\ M_B = \sum_{j \in B} M_j \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $M_i, M_j$  分别为送端机组  $i$  和受端机组  $j$  的惯性时间常数;  $\delta_i, \delta_j$  为对应转子角度;  $M_A, M_B$  分别为送、受端机群等值惯性时间常数。

#### 1.1 断面潮流增量下的角度变化

图2所示为机群  $G_{A_i} (i=1, \dots, n)$ 、 $G_B$  作为送端经BC向受端C供电的一维链式系统, BC为链式送端系统的外送断面,  $X_{A_1 A_2}, \dots, X_{A_n B}, X_{BC}$  分别为断面  $A_1 A_2, \dots, A_n B, BC$  的联系电抗。将机组  $G_{A_i}$  (按与受端距离由远及近记)、 $G_B$  相对受端的转子功角依次记为  $\delta_{A_1}, \delta_{A_2}, \dots, \delta_{A_n}, \delta_B$ 。据式(2), 发生送端链式系统与受端相对振荡时, 送受相对功角  $\delta_S$  可表示为

$$\begin{aligned} M_S &= \sum_{i=1}^n M_{A_i} + M_B \\ \delta_S &= (\sum_{i=1}^n M_{A_i} \delta_{A_i} + M_B \delta_B) / M_S \end{aligned} \quad (3)$$

式中:  $M_{A_i}, M_B$  为送端机组惯性时间常数;  $M_S$  为送端机群惯性时间常数之和。

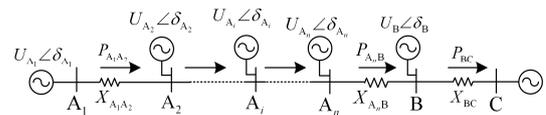


图2 链式系统模型

Fig. 2 Chain system model

研究中进行如下假设: ① 所有母线电压相等, 标幺值均为1.0; ② 输电线路  $R \ll X$  从而忽略其电阻; ③ 线路两端母线电压相角差  $\theta$  是所连机组角差  $\delta$  的函数, 忽略发电机内电抗, 则认为发电机内电动势的相角和与之相连的母线电压相角相等<sup>[16]</sup>, 两者记以  $\delta$  不再区分。

设某输电断面两端母线电压为  $U_1 \angle \delta_1, U_2 \angle \delta_2$ , 相位差  $\delta = \delta_1 - \delta_2$ , 断面联系电抗为  $X_{12}$ , 则断面潮流为  $P = (U_1 U_2 \sin \delta) / X_{12}$ 。

根据假设, 当断面潮流变化  $\Delta P$  时有

$$\Delta P = \Delta \sin \delta / X \quad (4)$$

表明断面潮流调整将直接导致两侧母线相对相位与两侧机组相对功角改变。

当  $\delta \in (0, \varepsilon)$  且  $\varepsilon \rightarrow 0$  时, 有

$$\Delta\delta = \Delta PX \quad (5)$$

即断面功率调整后两侧机组相对功角增量  $\Delta\delta$  可由潮流增量  $\Delta P$  与断面联系电抗  $X$  求取。考虑到断面两侧初始角度差  $\delta_0$  较大时,  $\Delta\delta > \Delta \sin \delta$ , 如图 3 所示, 使求得的  $\Delta\delta$  存在一定误差, 将断面  $P-\delta$  曲线在工作点  $\delta_0$  处线性化, 则  $\Delta P = \frac{\cos \delta_0}{X} \Delta\delta$ , 据此在式(5)中引入修正系数  $K' = 1/\cos \delta_0$ 。

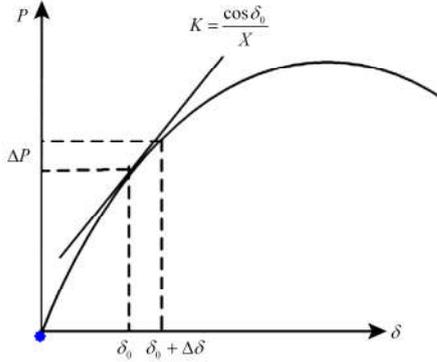


图 3 断面  $P-\delta$  曲线

Fig. 3 Transmission interface  $P-\delta$  curve

则断面两侧初始角度差为  $\delta_0$  时, 潮流增量  $\Delta P$  引起的角度差增量可表示为

$$\Delta\delta \approx K' \Delta \sin \delta = \Delta PX / \cos \delta_0 \quad (6)$$

链式系统中断面潮流调整时各机组角度增量为

$$\begin{cases} \Delta\delta_B = \Delta\delta_{BC} = \Delta P_{BC} X_{BC} / \cos \delta_{BC0} \\ \Delta\delta_{A_n} = \Delta\delta_{A_n B} + \Delta\delta_B = \Delta P_{A_n B} X_{A_n B} / \cos \delta_{A_n B0} + \Delta\delta_B \\ \vdots \\ \Delta\delta_{A_i} = \Delta\delta_{A_i A_{i+1}} + \Delta\delta_{A_{i+1}} = \Delta P_{A_i A_{i+1}} X_{A_i A_{i+1}} / \cos \delta_{A_i A_{i+1}0} + \Delta\delta_{A_{i+1}} \\ \vdots \\ \Delta\delta_{A_1} = \Delta\delta_{A_1 A_2} + \Delta\delta_{A_2} = \Delta P_{A_1 A_2} X_{A_1 A_2} / \cos \delta_{A_1 A_20} + \Delta\delta_{A_2} \end{cases} \quad (7)$$

式中:  $\delta_{A_i A_{i+1}0}$ ,  $\delta_{BC0}$  为断面  $A_i A_{i+1}$ , BC 初始角度差;  $\Delta P_{A_i A_{i+1}}$ ,  $\Delta P_{BC}$  为相应断面潮流增量;  $\Delta\delta_{A_i A_{i+1}}$ ,  $\Delta\delta_{BC}$  为相应的角度差增量;  $X_{A_i A_{i+1}}$ ,  $X_{BC}$  为断面联系电抗。

### 1.2 断面动态稳定敏感度与耦合关系计算

将式(7)代入式(3), 断面  $i$  潮流增量  $\Delta P_i$  下链式网络送受角度差增量表示为

$$\Delta\delta_S = \left( \sum_{i=1}^n M_{A_i} \Delta\delta_{A_i} \right) / M_S = \frac{X_{BC}}{\cos \delta_{BC0}} \Delta P_{BC} + \sum_{i=1}^n \frac{(\sum_{j=1}^i M_{A_j}) X_{A_i A_{i+1}}}{M_S \cos \delta_{A_i A_{i+1}}} \Delta P_{A_i A_{i+1}} \quad (8)$$

式中,  $\Delta P_{A_i A_{i+1}}$ ,  $\Delta P_{A_n B}$ ,  $\Delta P_{BC}$  的系数依次为  $K_i$  ( $i=1, \dots,$

$n+1$ ), 当各断面潮流增量相同时,  $K$  值越大的断面在  $\Delta P$  下的  $\Delta\delta_S$  将越大, 对系统动态稳定性的影响也就越大。现将  $K$  值归一化到 0~1 之间, 分别记  $K_{A_i A_{i+1}}$ ,  $K_{A_n B}$ ,  $K_{BC}$ , 用以表征断面对系统动态稳定性的影响程度, 也即断面敏感度, 值越大的断面越敏感。

$$\Delta\delta_S' = \Delta\delta_S / K_S = \sum_{i=1}^{n-1} K_{A_i A_{i+1}} \Delta P_{A_i A_{i+1}} + K_{A_n B} \Delta P_{A_n B} + K_{BC} \Delta P_{BC} \quad (9)$$

式中

$$\begin{cases} K_{A_i A_{i+1}} = K_i / K_S, i \in (1, \dots, n-1) \\ K_{BC} = K_{n+1} / K_S \\ K_S = \sqrt{\sum_{i=1}^{n+1} K_i^2} \end{cases}$$

当增加链式网络内部断面潮流, 同时减小外送 BC 断面潮流, 以保持送受两端角度差不变时, 系统动态稳定性能维持在原水平, 有  $\Delta\delta_S' = 0$ , 则可推导断面间耦合关系为

$$\Delta P_{A_i A_{i+1}} / \Delta P_{BC} = K_{BC} / K_{A_i A_{i+1}} \quad (10)$$

表示外送断面 BC 潮流变化  $\Delta P_{BC}$  与  $A_i A_{i+1}$  潮流增量与断面  $K_{BC} \Delta P_{BC} / K_{A_i A_{i+1}}$  对系统动态稳定性能的影响相当。

上述结论推广到实际的电力系统中, 则图 2 每台发电机都代表了一组同调机群, 联系电抗  $X_{A_i A_{i+1}}$  为两相邻机群间等值联系电抗。

## 2 三机链式系统算例验证

搭建 220 kV 三机链式系统如图 4, 取  $S_B = 100$  MVA,  $U_B = U_{av}$ 。其中, 发电机 G1-G3 额定容量分别 760 MW、760 MW、2280 MW, 惯性时间常数均为 9.11 s, 忽略机组内电抗, 线路 AB、BC 电抗为 0.022、0.066。若 BC 线路前侧 0 s 发生 A 相瞬时故障, 0.1 s 切除故障相, 0.6 s A 相重合成功而故障消除, 系统将出现机组 G1、G2 与 G3 间的相对振荡, 设置仿真时长为 20 s 并以 Prony 算法计算系统阻尼比。

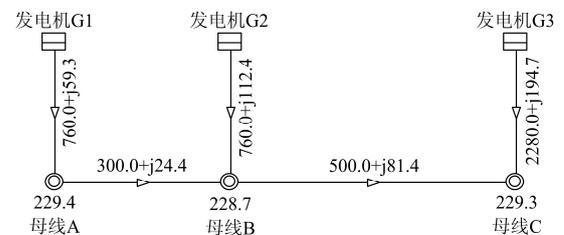


图 4  $P_{AB}=300$  MW、 $P_{BC}=500$  MW 时系统潮流图

Fig. 4 Power flow distribution when  $P_{AB}=300$  MW,  $P_{BC}=500$  MW

## 2.1 断面功率调整下的送受等值角度差增量

机组 G1, G2 与 G3 间相对功角为  $\delta_s = (\delta_A + \delta_B)/2$  (单位为弧度), 由式(8), 功率调整  $\Delta P$  时送受端功角差增量为

$$\Delta\delta_s = \frac{0.011}{\cos\delta_{AB0}} \Delta P_{AB} + \frac{0.066}{\cos\delta_{BC0}} \Delta P_{BC} \quad (11)$$

在  $P_{AB}=300$  MW、 $P_{BC}=400$  MW 的初始状态下保持  $P_{AB}$  不变, 以  $\Delta P=100$  MW 为步长逐渐减小  $P_{BC}$  时, 仿真得 BC 线路单瞬故障下的  $\delta_s$ 、 $\xi$  等系统运行信息如表 1 所示,  $\Delta\delta_s$  依次为  $3.96^\circ$ 、 $4.09^\circ$ 、 $4.26^\circ$ 、 $4.49^\circ$ ; 且随  $\delta_s$  增大, 系统动态稳定性能不断恶化, 阻尼比由 0.060 大幅下降至 0.037。而根据式(11)对  $\Delta\delta_s$  作理论推导, 在  $P_{BC}$  增加过程中  $\Delta\delta_s$  依次为  $3.91^\circ$ 、 $3.99^\circ$ 、 $4.09^\circ$ 、 $4.22^\circ$ , 对比得, 理论计算与仿真结果间误差均在 5%之内。

表 1  $P_{BC}$  变化下的三机系统运行信息

Table 1 Three-machine system operating information

with $P_{BC}$ change					
$P_{AB}$	$P_{BC}$	$\delta_{G1}$	$\delta_{G2}$	$\delta_s$	$\xi$
300	400	19.217	14.821	17.019	0.060
300	500	23.357	18.62	20.989	0.055
300	600	27.657	22.507	25.082	0.051
300	700	32.166	26.527	29.347	0.045
300	800	36.945	30.744	33.845	0.037

可见, 根据联络电抗及断面角度差等信息求取某一断面潮流增量下送受角度差增量的计算方法简便实用, 结果准确。

## 2.2 断面动态稳定敏感度及耦合关系

基于三机链式系统, 分别在送受等值角度差为  $21^\circ$ 、 $44^\circ$  两种工况下仿真, 对断面动态稳定敏感度及耦合关系的理论推导结果进行验证。

1)  $\delta_s = 21^\circ$

(1) 断面耦合关系理论推导

系统在  $P_{AB}=300$  MW、 $P_{BC}=500$  MW 时的潮流分布如图 4 所示,  $\delta_{G1}=23.36^\circ$ 、 $\delta_{G2}=18.62^\circ$ 、 $\delta_s=20.99^\circ$ 。在 BC 线路 A 相瞬时故障下, 系统出现机组 G1、G2 与 G3 间频率为 0.80 Hz 的强阻尼振荡, 阻尼比为 0.055。

计算得  $\delta_{AB0}=4.74^\circ$ 、 $\delta_{BC0}=18.62^\circ$ , 代入式(11)

得  $\Delta\delta_s' = 0.157\Delta P_{AB} + 0.988\Delta P_{BC}$ , 即系统动态稳定性对 AB、BC 断面潮流的敏感度分别为 0.157、0.988, BC 断面更敏感; 代入式(10)得两断面潮流间的耦合比例为  $\Delta P_{AB} = 6.3\Delta P_{BC}$ , 表明 AB 潮流变化  $\Delta P$  等效于 BC 潮流变化  $6.3\Delta P$  对系统动态稳定性的影响。

(2) 仿真验证

如表 2 增大  $P_{AB}$  并减小  $P_{BC}$  以保持制约故障下  $\delta_s$  与  $\xi$  不变。

表 2  $P_{AB}$  增加  $P_{BC}$  减小时系统运行信息

Table 2 System operating information with  $P_{AB}$  and  $P_{BC}$  change

$P_{AB}$	$P_{BC}$	$\delta_{G1}$	$\delta_{G2}$	$\delta_s$	$\xi$
253	507	23.10	18.93	21.01	0.056
300	500	23.36	18.62	20.99	0.055
348	493	23.66	18.34	21.00	0.055
396	486	23.94	18.04	20.99	0.054
443	479	24.24	17.77	21.00	0.053

可见,  $P_{AB}$  增加 47 MW、同时  $P_{BC}$  减少 7 MW 时,  $\delta_s$  保持在  $21^\circ$ , 且  $\xi$  维持在 0.05 水平上。断面 AB、BC 潮流耦合度即为 6.7:1, BC 潮流调整 1 MW 与断面 AB 调整 6.7 MW 对系统阻尼特性的影响程度相当, 与理论分析结果基本一致。

2)  $\delta_s = 44.0^\circ$

在  $P_{AB}=300$  MW、 $P_{BC}=1001$  MW 的潮流下,  $\delta_{G1}=47.79^\circ$ 、 $\delta_{G2}=40.22^\circ$ 、 $\delta_s=44.0^\circ$ 。BC 联络线受扰动后, 系统发生频率为 0.74 Hz 的弱阻尼振荡, 阻尼比为 0.016。计算得断面敏感度为:

$\Delta\delta_s' = 0.127\Delta P_{AB} + 0.99\Delta P_{BC}$ , 断面潮流间的耦合比例为  $\Delta P_{AB} = 7.79\Delta P_{BC}$ 。

仿真中, 增大  $P_{AB}$  并减小  $P_{BC}$  以保持制约故障下  $\delta_s$  与  $\xi$  不变。

表 3  $P_{AB}$  增加  $P_{BC}$  减小时系统运行信息

Table 3 System operating information with  $P_{AB}$  and  $P_{BC}$  change

$P_{AB}$	$P_{BC}$	$\delta_{G1}$	$\delta_{G2}$	$\delta_s$	$\xi$
284	1003	47.66	40.34	44.01	0.016
300	1001	47.79	40.22	44.00	0.016
316	999	47.87	40.11	43.99	0.016
333	997	48.00	39.99	43.99	0.015
357	994	48.12	39.88	44.00	0.015

由表 3 可见,  $P_{AB}$  增加 16 MW,  $P_{BC}$  需减少 2 MW, 方使  $\delta_s$  保持在  $44^\circ$  且  $\xi$  维持 0.016 水平。则知断面 AB、BC 耦合度为 8:1, 与理论分析结果基本一致。

## 3 蒙西链式电网断面耦合特性分析

内蒙古西部电网(简称蒙西)外送和内部呼丰、呼包、布日、乌布断面呈现长链状结构, 构成了多断面耦合的链式电网。图 5 为蒙西 500 kV 电网结构示意图, 当外送断面上丰泉-万全通道发生三永 N-1 时, 蒙西机群与受端华北参考机组间的相对功角出现弱阻尼振荡, Prony 分析表明系统振荡频率为

0.34 Hz, 为典型的区域振荡模态, 阻尼比为 0.016。

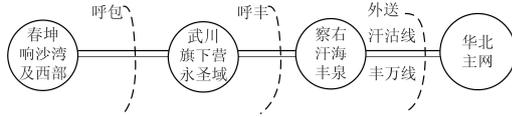


图 5 蒙西 500 kV 电网结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of Mengxi 500 kV power grid

考虑到机组动态行为间的差异由彼此电气联系的紧密程度决定, 将蒙西机组按断面划分为呼包、呼丰、外送断面送端机组, 分别包括春坤、响沙站及其西部范围机组, 武川、旗下、永圣站范围机组, 察右、汗海、丰泉附近机组, 仿真表明此划分方式下的断面机组间同调状况良好。据此将电网等值为图 6 所示,  $A_1A_2$ 、 $A_2B$ 、 $BC$  断面依次代表呼包、呼丰和外送断面,  $C$  为受端等值系统。各断面潮流与等值联系电抗、送端机群等值信息如表 4 所示。

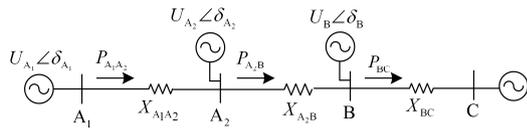


图 6 蒙西多断面等值网络

Fig. 6 Mengxi equivalent network with multi-sections

表 5 呼包与外送断面耦合情况

Table 5 Power flows coupling situation between Hubao and external-delivery section

$\delta_s$	$\xi$	呼包断面		呼丰断面		外送断面	
46.02	0.016	4200	50.96	6300	36.03	4500	19.81
46.03	0.016	4300	51.19	6300	35.50	4410	18.93
46.02	0.016	4400	51.40	6300	35.01	4325	18.04
46.02	0.015	4500	51.59	6300	34.50	4235	17.17
46.03	0.015	4600	51.78	6300	34.03	4150	16.32

表 6 呼丰与外送断面潮流调整量耦合情况

Table 6 Power flows coupling situation between Hufeng and external-delivery section

$\delta_s$	$\xi$	呼包断面		呼丰断面		外送断面	
46.02	0.016	4200	50.96	6300	36.03	4500	19.81
46.01	0.016	4200	50.96	6400	36.47	4440	18.41
46.02	0.016	4200	50.98	6500	36.98	4320	17.22
46.03	0.015	4200	50.97	6600	37.42	4315	16.21
46.01	0.015	4200	50.96	6700	37.85	4250	15.01

可见, 当蒙西-华北等值角度差不变时, 系统阻尼比基本维持在相同水平。比较两表得, 呼包、呼丰断面相对外送断面的耦合度分别为 100:90、100:60 即 1.11:1、1.66:1, 与上节理论计算结果基本吻合。外送断面潮流变化对系统动态稳定特性影响最大, 其次为呼包断面, 与蒙西实际运行情况也相一致。

表 4 各断面通道及送端机群等值信息

Table 4 Equivalent information of every sections and sending-end power units

	断面潮流/MW 与 等值联系电抗/p.u.		惯性时间 常数/s	等值角 度/(°)
$A_1A_2$	4200	0.0063	731.02	50.96
$A_2B$	6300	0.0043	178.08	36.03
$BC$	4500	0.0072	69.79	19.8

### 3.1 蒙西多断面等值系统理论分析

进行等值后计算送受相对角度为  $\delta_s = 46.02^\circ$ 。为避免电源支撑对通道输电能力的影响<sup>[17]</sup>, 分析中假定蒙西电网开机方式不变, 通过调整负荷水平大小来平衡电力。根据式(3), 当断面潮流调整时, 各断面送受端角度差增量与断面联系电抗、当前工作点处角度差有关, 计算相关变量并将之代入式(9), 即知蒙西各断面对系统动态稳定性的影响度分别为 0.6、0.41、0.69; 呼包、呼丰断面潮流调整量相对外送的耦合比例为:  $\Delta P_{A_1A_2} = 1.15\Delta P_{BC}$ 、 $\Delta P_{A_2B} = 1.68\Delta P_{BC}$ 。

### 3.2 断面动态稳定耦合关系仿真验证

分别增加呼包、呼丰断面潮流, 相应减少外送功率, 使  $\delta_s$  保持在  $46.02^\circ$ , 各断面特征与系统阻尼比的变化如表 5、表 6 所示。

## 4 断面动态稳定敏感度与耦合度的应用

在链式电网实际运行中, 预先根据工况计算出的断面间耦合度, 可作为地区负荷需求变动下断面潮流调整的依据。当关注断面  $i$  潮流因受端负荷需求而增加  $\Delta P_i$  时, 减少非关注断面  $j$  的潮流  $K_i\Delta P_i/K_j$ , 便可既满足实际需求, 又保证了系统动

态稳定水平。另一方面,配置站内 STATCOM 等 FACTS 元件<sup>[18]</sup>、对重要机组 PSS 参数进行优化或在控制系统中增加阻尼控制环节<sup>[19-21]</sup>,均能提高系统阻尼,而敏感断面送端机组相比其他位置机组对系统阻尼的影响更大,因此依据断面敏感度确定目标机群后采取对应措施,能够获得更为显著的动态稳定性能改善效果。此外,在影响电网动态稳定水平的关键制约断面加强网架强度,对系统动态稳定会有质的提高<sup>[20]</sup>。

以蒙西电网实际运行中呼包断面受端永圣域、旗下营地区负荷增加后的方式调整为例,当呼包断面受电区负荷增加 6%(约为 180 MW)时,增加呼包送端出力 180 MW 后,根据呼包与外送断面潮流耦合度 1.11:1,采取了减小外送断面送电区丰泉、汗海等地 160 MW 出力的措施,从而达到了既满足负荷需求又保证系统原来动态稳定水平的目标,避免了以往在断面潮流配合过程中的多次调整。

## 5 结论

本文对链式结构网络中多断面间的耦合关系进行了机理分析,并提出了系统动态稳定性关于断面潮流的相对敏感度和断面间耦合度的计算方法,通过在三机系统及蒙西实际链式电网中的应用验证了方法的有效性与可行性。耦合度清晰直观地呈现了系统一定动态稳定水平下断面潮流间的耦合关系,能够依据实际运行需求为不同断面优化控制策略提供有力依据,具有一定的实用价值。

## 参考文献

[1] 朱方,赵红光,刘增煌,等. 大区电网互联对电力系统动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(1): 1-7.  
ZHU Fang, ZHAO Hongguang, LIU Zenghuang, et al. The influence of large power grid interconnected on power system dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(1): 1-7.

[2] 杨海涛,丁茂生,宋新立,等. 电力系统动态稳定机理和稳定措施分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(14): 35-39.  
YANG Haitao, DING Maosheng, SONG Xinli, et al. Analysis on power system dynamic stability mechanisms and stabilizing measures[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(14): 35-39.

[3] WANG K W, CHUNG C Y, TSE C T, et al. Multi-machine eigenvalue sensitivities of power system parameters[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2):

741-747.

[4] 林章岁,蒋朋博,石建. 与华东联网后福建电网的稳定控制探讨[J]. 华东电力, 2004, 32(9): 35-38.  
LIN Zhangsui, JIANG Pengbo, SHI Jian. Discussion on stability control of Fujian Power Grid after being interconnected to East China Power Grid[J]. East China Electric Power, 2004, 32(9): 35-38.

[5] 赵学强,杨增辉. 华东-福建联网低频振荡问题分析[J]. 华东电力, 2006, 34(2): 21-24.  
ZHAO Xueqiang, YANG Zenghui. Study on low frequency oscillation after the interconnection of East China and Fujian power grids[J]. East China Electric Power, 2006, 34(2): 21-24.

[6] 陈准金,陈星莺. 条状电力系统阻尼特性分析及控制措施研究[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 257-261.  
CHEN Huajin, CHEN Xingying. Damping analysis and control for longitudinal power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4): 257-261.

[7] 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): 53-58.  
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): 53-58.

[8] 徐泰山,彭慧敏,苏寅生,等. 基于并行模式的关联输电断面极限功率计算[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7): 66-70.  
XU Taishan, PENG Huimin, SU Yinsheng, et al. Limit power calculation of correlative transmission interfaces based on a parallel model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7): 66-70.

[9] 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.

[10] 王娜娜,刘涤尘,廖清芬,等. 基于断面潮流的大电网实用小扰动稳定域[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 43-48.  
WANG Nana, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Practical small signal stability region of large power grid based on interface power flow[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 43-48.

[11] 刘志坚,束洪春,于继来,等. 计及网侧工况的阻尼影

- 响因素分析[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(8): 49-53.  
LIU Zhijian, SHU Hongchun, YU Jilai, et al. Analysis of damping influencing factors considering operational condition at network side[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(8): 49-53.
- [12] 王青, 马世英. 电力系统区间振荡的阻尼与区域间送电功率关系特性[J]. 电网技术, 2011, 35(5): 40-45.  
WANG Qing, MA Shiyong. Relationship between inter-area oscillation damping in power system and inter-area transmitted power[J]. Power System Technology, 2011, 35(5): 40-45.
- [13] RUIZ-VEGA D, MESSINA A R, PAVELLA M. Online assessment and control of transient oscillations damping[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 1038-1047.
- [14] 刘福锁, 杨卫东, 黄志龙, 等. 基于系统响应检测的安全稳定控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(增刊 1): 25-28.  
LIU Fusuo, YANG Weidong, HUANG Zhilong, et al. Security stability control method based on system response measurement[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(S1): 25-28.
- [15] 项丽, 鲍颜红, 耿天翔, 等. 基于广域信息的发电机电压控制抑制区间低频振荡方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(18): 18-22.  
XIANG Li, BAO Yanhong, GENG Tianxiang, et al. Damping inter-area low frequency oscillations method for generator voltage control based on wide-area information[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(18): 18-22.
- [16] 王德林, 王晓茹. 有限长均匀链式电力系统中机电扰动传播分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 87-94.  
WANG Delin, WANG Xiaoru. Analysis on electromechanical disturbance propagation in a finite-length uniform chain discrete power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 87-94.
- [17] 丁剑, 张文朝, 卜广全, 等. 大规模风电接入下的河西走廊远距离大容量输电[J]. 高电压技术, 2009, 35(8): 2037-2041.  
DING Jian, ZHANG Wenchao, BU Guangquan, et al. Long distance and huge capacity transmission of Gansu corridor under large-scale wind power integration circumstance[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(8): 2037-2041.
- [18] 朱涛, 段荣华, 汪震. 不同类型单一 FACTS 元件对改善滇西电网动态稳定水平的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(20): 65-70.  
ZHU Tao, DUAN Ronghua, WANG Zhen. Research on different types of single FACTS element improving dynamic stability Western Yunnan Power Grid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(20): 65-70.
- [19] 刘蔚, 赵勇, 吴琛, 等. 一种提高多小水电群送出能力的 PSS 参数协调优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 44-50.  
LIU Wei, ZHAO Yong, WU Chen, et al. A method of PSS parameters coordinated optimization for the improvement of transmission capacities of multiple small hydropower station groups[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 44-50.
- [20] 张祥宇, 付媛, 王毅, 等. 含虚拟惯性与阻尼控制的变速风电机组综合 PSS 控制器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 159-169.  
ZHANG Xiangyu, FU Yuan, WANG Yi, et al. Integrated PSS controller of variable speed wind turbines with virtual inertia and damping control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 159-169.
- [21] 杨悦, 李国庆. 基于 VSC-HVDC 的海上风电小干扰稳定控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(13): 101-110.  
YANG Yue, LI Guoqing. The small signal stability control of offshore wind farm based on VSC-HVDC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(13): 101-110.
- [22] 程浩, 冯艳虹, 张道农, 等. 蒙西电网动态稳定问题分析及稳定措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 137-143.  
CHENG Hao, FENG Yanhong, ZHANG Daonong, et al. Analysis of dynamic stability issues of West Inner Mongolia power grid and research on its control measures[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 137-143.

收稿日期: 2016-03-16; 修回日期: 2016-09-05

作者简介:

梁艳红(1992-), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: lyh\_ncepu@126.com

张文朝(1978-), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事电力系统稳定分析与控制方面的研究工作。E-mail: zhangwenchao@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 周金梅)