

## 新疆—西北电网联网前后阻尼特性研究

王佳明<sup>1</sup>, 刘文颖<sup>1</sup>, 牛拴保<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206; 2. 西北电网有限公司, 陕西 西安 710048)

**摘要:** 从系统阻尼特性出发, 从理论上推导了联络线阻抗值对互联电网阻尼的影响。通过小干扰稳定分析法和时域仿真法分析新疆—西北电网联网前后系统阻尼特性的变化, 并采用 Prony 分析法校验联网前后的主振模式, 结果表明联网后系统阻尼比减小, 动态品质明显下降。增加新疆—西北电网省际间联络线降低互联阻抗后, 仿真计算表明, 互联电网动态稳定性大大提高。建议加快新疆—西北电网联络线建设。

**关键词:** 联络线阻抗值; 小干扰稳定分析法; Prony 分析法; 阻尼特性; 动态稳定性

### Study on damping characteristics of Xinjiang-Northwest power grid before and after interconnection

WANG Jia-ming<sup>1</sup>, LIU Wen-ying<sup>1</sup>, NIU Shuan-bao<sup>2</sup>

(1. School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;  
2. Northwest China Grid Company Limited, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** The effects of tie-line impedance value on the damp of interconnected power systems are analyzed theoretically from the viewpoint of damping characteristics. This paper focuses on the changes in damping characteristics before and after interconnection through the small signal stability analysis and time domain simulation, and makes a check of the dominant oscillation modes by means of Prony analysis before and after interconnection. Results show that the damping ratio of the system is decreased after the interconnection, and the dynamic quality is reduced significantly. The simulation after increase of tie-lines to reduce the tie-line impedance shows that the dynamic stability of interconnected system is improved significantly. The paper suggests speeding up tie-line construction of Xinjiang-Northwest power grid.

**Key words:** tie-line impedance value; power system small signal stability analysis; Prony analysis; damping characteristics; dynamic stability

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)16-0092-07

## 0 引言

随着我国互联电网规模的不断扩大, 动态稳定性问题已成为影响互联电网稳定运行的重要因素<sup>[1]</sup>。例如, 东北与华北互联后系统中机电振荡模式的最低振荡频率为 0.3 Hz 左右。东北、华北、华中(包括川渝)联网后, 互联系统中的区域间振荡模式最低振荡频率在 0.1~0.2 Hz 之间。南方电网虽然网架结构已大大加强, 但低频振荡现象时有发生, 2003 年 3 月 6 日发生的低频振荡频率为 0.4 Hz<sup>[2]</sup>。事后进行的大量分析研究表明, 电力系统重负荷运行、远距离送电或者采用高增益的励磁调节器产生的负阻尼分量会抵消甚至超过系统本身提供的正阻尼时, 这时系统受到扰动, 会出现长时间振荡不衰减甚至增幅的低频振荡。

根据电网规划, 2010 年西北电网将通过长达 1 270 km 的 750 kV 交流输电线路与新疆电网互联, 形成东西向距离超过 4 000 多 km 的长链式巨型电网。网架结构的变化, 无论对新疆电网还是西北电网的动态运行特性都会产生很大的影响。

本文采用中国电力科学研究院开发的电力系统分析综合程序 6.25 版(PSASP6.25), 对新疆—西北电网联网前后, 新疆和西北电网的动态运行特性进行仿真计算, 包括电网阻尼特性、低频振荡模式, 并用 Prony 分析法对仿真计算分析结果进行校验。

## 1 大区域电网互联对阻尼特性的影响

以单机无穷大系统为例, 等值模型如图 1 所示, 假定  $E'$  恒定, 且幅值为扰动前的值, 忽略所有电阻。

令  $\delta$  为  $E'$  超前无穷大母线电压  $E_M$  的角度。当系统受到扰动时, 发电机转子振荡,  $\delta$  发生变化。由图 1 可知存在以下电路关系:

基金项目: 国家电网公司科技计划项目(SGKJ[2007]1078)

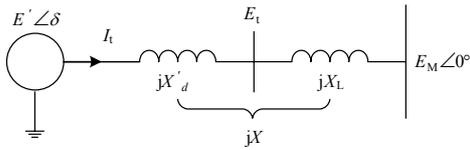


图 1 单机无穷大系统等值模型

Fig.1 Equivalent model of single-machine and infinite-bus system

$$I_t = \frac{E' \angle \delta - E_M \angle 0^\circ}{jX} = \frac{(E' \cos \delta - E_M) + jE' \sin \delta}{jX} \quad (1)$$

$$E' = E_{t0} + jX'_d I_{t0} \quad (2)$$

$$X = X'_d + X_L \quad (3)$$

$x'_d$ 后的视在功率为:

$$S = P + jQ = E' I_t^* = \frac{E' E_M \sin \delta}{X} + j \frac{E'(E' - E_M \cos \delta)}{X} \quad (4)$$

在上述假设中, 已经忽略了定子电阻的影响, 则电磁功率 ( $P_e$ ) 等于发电机端口功率 ( $P$ ), 电磁转矩 ( $T_e$ ) 的标么值等于电磁功率的标么值, 因此:

$$T_e = P_e = P = \frac{E' E_M \sin \delta}{X} \quad (5)$$

令  $\delta = \delta_0 + \Delta\delta$ , 泰勒展开忽略二阶及高阶项, 则有:

$$T_e = T_{e0} + \Delta T_e = \frac{E' E_M \sin \delta_0}{X} + \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta\delta \quad (6)$$

由此可得:

$$\Delta T_e = \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \Delta\delta = \frac{E' E_M \cos \delta_0}{X} (\Delta\delta) \quad (7)$$

电力系统的摇摆方程式由两个一阶微分方程 (标么值) 表示为<sup>[3]</sup>:

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (T_m - T_e - K_D \Delta\omega_r) \quad (8)$$

$$\frac{d\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega_r \quad (9)$$

式中:  $\Delta\omega_r$  为标么值速度偏差;  $T_m$  为机械转矩;  $K_D$  为阻尼因子;  $H$  为惯性系数;  $\omega_0$  为基准转子电气速度。

将式 (8) 线性化, 且把式 (7) 代入, 可得:

$$\frac{d\Delta\omega_r}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta T_m - K_s \Delta\delta - K_D \Delta\omega_r) \quad (10)$$

式中:  $K_s = \left(\frac{E' E_M}{X}\right) \cos \delta_0 \quad (11)$

$K_s$  即同步转矩系数将式 (9) 线性化可得:

$$\frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_0 \Delta\omega_r \quad (12)$$

将式 (10) 和式 (12) 拉普拉斯变换后合并得:

$$s^2 (\Delta\delta) + \frac{K_D}{2H} s (\Delta\delta) + \frac{K_s}{2H} \omega_0 (\Delta\delta) = \frac{\omega_0}{2H} \Delta T_m \quad (13)$$

因此, 提取出特征方程式为:

$$s^2 + \frac{K_D}{2H} s + \frac{K_s}{2H} \omega_0 = 0 \quad (14)$$

令  $\omega_n = \sqrt{K_s \frac{\omega_0}{2H}}$ , 则式 (14) 可以表示为:

$$s^2 + 2\xi \omega_n s + \omega_n^2 = 0 \quad (15)$$

阻尼比表示为:

$$\xi = \frac{1}{2} \frac{K_D}{2H \omega_n} = \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{K_s 2H \omega_0}} \quad (16)$$

在电力系统受扰之前, 假定发电机端发出功率为  $P_0 + jQ_0$ , 以  $E_t$  作为参考相量时, 有:

$$I_{t0} = \frac{(P_0 + jQ_0)^*}{E_{t0}} = P_0 - jQ_0 \quad (17)$$

可推出:

$$E'_0 \angle \delta_{01} = E_{t0} \angle 0^\circ + (P_0 - jQ_0) jX'_d \quad (18)$$

$$E_{t0} \angle 0^\circ - jX_L (P_0 - jQ_0) = E_{M0} \angle \delta_{02} \quad (19)$$

$$\delta_0 = \delta_{01} + \delta_{02} \quad (20)$$

联立式 (18) ~ (20) 可得:

$$\cos \delta_0 = \frac{(E_{t0} + Q_0 X'_d)(E_{t0} + Q_0 X_L) + P_0^2 X'_d}{E'_0 E_{M0}} \quad (21)$$

将式 (21) 代入式 (11) 可得:

$$K_s = \frac{(E_{t0} + Q_0 X'_d)(E_{t0} + Q_0 X_L) + P_0^2 X'_d}{X'_d + X_L} = \frac{(E_{t0} + Q_0 X'_d) E_{t0} + P_0^2 X'_d + \frac{Q_0 (E_{t0} + Q_0 X'_d)}{X'_d / X_L + 1}}{X'_d + X_L} \quad (22)$$

在电力系统中, 发电机所发出的功率大部分经由线路输送出去, 因而连接发电机的线路容量接近发电机的容量, 此时线路的阻抗与发电机的内部阻抗在同一个数量级上<sup>[4]</sup>。在大区互联系统中, 由于联络线容量较大区等值发电机容量小得多, 因此互联系统的联络线电抗  $X_L$  一般远大于等值发电机的电抗  $X'_d$ , 因此  $X'_d / X_L < 1$ 。

由式 (22) 可知, 大区电网互联后, 联络线电抗  $X_L$  较  $X'_d$  越大, 则同步转矩系数  $K_s$  越大; 同时, 由式 (16) 可知, 同步转矩系数  $K_s$  增大, 阻尼比  $\xi$  减小。所以, 对于大区电网互联系统来说, 其联络线阻抗削弱了系统阻尼, 联络线阻抗越大, 系统阻

尼比越小，而系统阻尼比是影响系统振荡模式的主要因素。

## 2 电力系统小干扰稳定分析法

采用系统小干扰稳定分析法可确定系统阻尼特性，并对系统振荡模式进行详细分析。

电力系统的模型在数学上可以统一描述成如下一般形式的微分-代数方程：

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y) \quad (23)$$

$$0 = g(x, y) \quad (24)$$

式中： $x$  表示微分方程组中描述系统动态特性的状态变量； $y$  表示代数方程组中系统的运行参量。

将描述电力系统动态特性的微分-代数方程式 (23)、式 (24) 在稳态运行点  $(x(0), y(0))$  线性化，得：

$$\begin{bmatrix} d\Delta x / dt \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (25)$$

在式 (25) 中消去运行向量  $\Delta y$ ，得到：

$$\frac{d\Delta x}{dt} = A\Delta x \quad (26)$$

式中：

$$A = A - BD^{-1}C \quad (27)$$

$A$  为  $n \times n$  阶系统状态矩阵， $n$  为系统总状态变量数。

小干扰稳定分析在数学上可归结为状态矩阵  $A$  特征值的求取，即求取线性方程式 (28) 的解。其解为系统与机电模式相关的特征值。

$$|A - \lambda I| = 0 \quad (28)$$

求出的  $A$  阵特征值  $\lambda$  可表示为：

$$\lambda = \sigma \pm j\omega \quad (29)$$

式中： $\sigma$  为衰减系数； $\omega$  为振荡角频率。

其阻尼比  $\xi$  为：

$$\xi = -\sigma / \sqrt{\sigma^2 + \omega^2} \quad (30)$$

有  $n$  台发电机的电力系统，有  $n-1$  个机电振荡模式，相应地，矩阵  $A$  则具有  $n-1$  对特征值。特征值的实部  $\sigma$  反映衰减性能， $\omega$  反映振荡频率<sup>[5]</sup>。判断一个振荡模式是否稳定的判据是其阻尼比的大小。对电力系统而言，当一个振荡模式的阻尼比为接近 0 的正数时，即弱阻尼或极弱阻尼，则系统存在不稳定因素<sup>[6]</sup>。

阻尼比的大小反映时域响应曲线振荡衰减的快慢，阻尼比越大，振荡衰减越快<sup>[7]</sup>。根据运行经验，

一般来说若阻尼比小于 0 则为负阻尼，系统不能稳定运行；阻尼比介于 0~0.02 为弱阻尼；阻尼比大于 0.03 为较弱阻尼，区域振荡模式的阻尼比在正常方式下一般应达到 0.03 以上；阻尼比大于等于 0.04~0.05 为适宜的系统阻尼。如果系统存在负阻尼或弱阻尼机电振荡模式，则系统在受到扰动后容易发生低频振荡，故应考虑必要的控制措施来改善系统阻尼<sup>[8]</sup>。

通过对  $\lambda$  和  $\xi$  的分析可确定低频振荡模式，再通过相关性、灵敏度分析，可找到与该模式相关的机组。

电力系统中低频振荡一般存在两种振荡模式。一种振荡模式主要表现为 1 台（或 1 个发电厂的）发电机相对系统中另外少数几台或者所有发电机的振荡，称之为地区振荡模式（Local Mode），频率一般在 0.5~2.0 Hz 之间；另一种振荡模式主要表现为一个区域内的某发电机群相对另一个区域内的某发电机群的振荡，或表现为一个区域内的所有发电机相对另一个区域内的所有发电机间的振荡，称之为区域振荡模式（Inter-area Mode），频率一般在 0.1~1.0 Hz 之间<sup>[9]</sup>。

互联系统的动态稳定性往往是由区域间振荡模式的稳定性决定<sup>[10]</sup>。互联电网的联络线阻抗值是影响联网后系统阻尼特性的主要因素。

## 3 联网前、后新疆电网与西北电网阻尼特性分析

### 3.1 西北、新疆联网系统概述

西北电网与新疆电网联网前由陕西、甘肃、青海、宁夏四省网组成，通过 330 kV 及 750 kV 联络线实现省际间的互联。新疆电网的主电压等级是 220 kV，大部分接线为单回线，且南北部电网之间电气距离比较远。2010 年新疆电网将通过 750 kV 哈密-安西双回线与西北电网实现互联如图 2 所示。

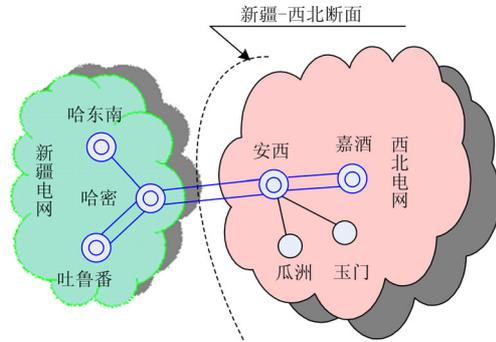


图 2 2010 年新疆-西北电网断面地理接线示意图  
Fig.2 Geographic schematic connection diagram of surface of Xinjiang-Northwest grid in 2010

### 3.2 联网前新疆电网阻尼特性和低频振荡模式

采用小干扰稳定法和时域仿真法分析联网前新疆电网的阻尼特性。

(1) 小干扰稳定分析结果表明, 联网前新疆电网的主导振荡模式的阻尼比很小, 如表 1 所示。

表 1 新疆电网振荡模式

Tab.1 Oscillation models of Xinjiang grid

| 模式序号 | 模式                    | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|------|-----------------------|-------|-------|
| 1    | -0.284 959+j6.997 525 | 1.11  | 4.07  |
| 2    | -0.136 158+j6.374 299 | 1.01  | 2.14  |
| 3    | -0.013 321+j1.008 822 | 0.16  | 1.32  |
| 4    | -0.015 068+j1.382 301 | 0.22  | 1.09  |

模式 4 为新疆南部机组对北部机组的弱阻尼区域振荡模式, 为该方式下的主导振荡模式, 与该模式相关性最强的机组新疆南部是波波娜水电; 新疆北部是石河子。

(2) 时域仿真表明, 在大干扰下, 联网前的新疆电网同样呈现出弱阻尼特性, 机组之间相对功角长时间振荡不平息。220 kV 龟兹-轮胎 I 线龟兹侧发生三相永久故障扰动下, 新疆电网典型发电机摇摆曲线如图 3 所示, 可以看出, 该大扰动下新疆电网典型机组之间的功角持续振荡。

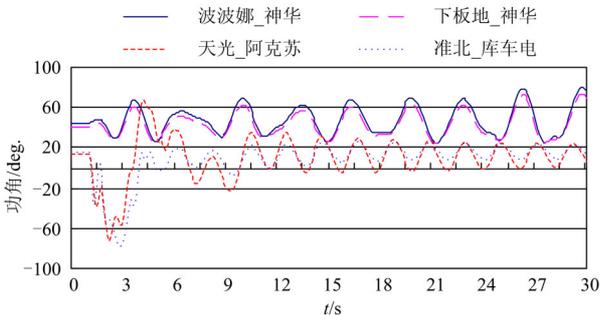


图 3 220 kV 龟兹-轮胎 I 线三相永久故障扰动下新疆电网典型发电机摇摆曲线

Fig.3 Curves of power angle swing of generators in Xinjiang power grid under three-phase permanent fault on 220 kV line I Qiuci-Luntai

### 3.3 联网前西北电网阻尼特性和低频振荡模式

采用小干扰稳定法和时域仿真法分析联网前西北电网的阻尼特性。

(1) 小干扰稳定分析结果表明, 2010 年联网前西北电网存在弱阻尼主导振荡模式。如表 2 所示。

表 2 西北电网振荡模式

Tab.2 Oscillation models of Northwest grid

| 模式序号 | 模式                    | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|------|-----------------------|-------|-------|
| 1    | -0.121 17+j4.208 034  | 0.67  | 2.88  |
| 2    | -0.188 303+j4.164 714 | 0.65  | 4.52  |

模式 1 是陕西电网对甘青宁电网的区域振荡模式, 属于较弱阻尼低频振荡, 为该方式下的主导振荡模式, 与该模式相关性最强的机组陕西电网是蜀河电厂; 甘青宁主网是多合电厂; 模式 2 是强阻尼振荡, 暂不考虑。

(2) 时域仿真表明, 大干扰下, 联网前西北电网呈现出弱阻尼特性, 陕甘断面一回联络线发生三相永久故障扰动下西北电网典型发电机的摇摆曲线如图 4 所示, 可以看出, 该大扰动下西北电网典型机组之间的功角长时间振荡不平复, 但振荡幅度比较小。

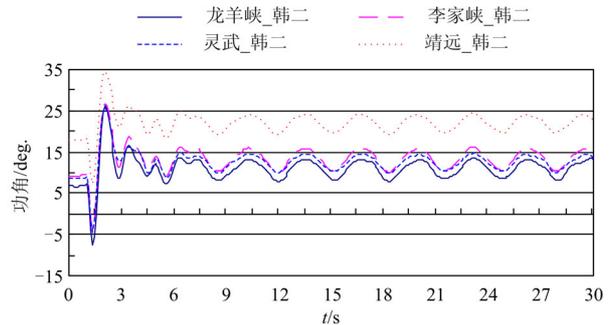


图 4 陕甘断面一回联络线三相永久故障扰动下西北电网典型发电机的摇摆曲线

Fig.4 Curves of power angle swing of generators in Northwest grid under three-phase permanent fault on one tie line between Shaanxi-Gansu

### 3.4 联网后西北-新疆电网阻尼特性的变化

2010 年西北-新疆电网通过 750 kV 双回线交流弱互联后, 动态特性发生了变化。

(1) 通过小干扰稳定分析表明, 互联后的新疆-西北电网存在弱阻尼主导振荡模式, 如表 3 所示。

表 3 联网后西北-新疆电网的振荡模式

Tab.3 Oscillation models after interconnection between Xinjiang grid and Northwest grid

| 模式序号 | 模式                    | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|------|-----------------------|-------|-------|
| 1    | -0.135 269+j3.893 947 | 0.62  | 3.47  |
| 2    | -0.147 804+j4.456 327 | 0.71  | 3.32  |
| 3    | -0.149 187+j4.758 997 | 0.76  | 3.13  |
| 4    | -0.073 261+j3.701 103 | 0.59  | 1.98  |
| 5    | -0.078 722+j4.152 243 | 0.66  | 1.89  |
| 6    | -0.081 066+j4.396 784 | 0.71  | 1.84  |
| 7    | -0.129 976+j7.112 856 | 1.13  | 1.83  |
| 8    | -0.064 637+j4.335 397 | 0.69  | 1.49  |

模式 1~3 是正常阻尼区域振荡模式, 暂不考虑; 模式 4~8 是弱阻尼区域振荡模式, 其中, 模式 8 是新疆电网机组相对于西北主网机组之间的振荡, 振荡频率为 0.69 Hz, 阻尼比仅为 0.014 9, 为

该方式下的主导振荡模式，与该模式相关性最强的机组是新疆电网红电 1 J。

表 3 中，模式 1、2 和 4 为新疆电网内部机群之间的振荡，其中模式 4 的阻尼比最小，为 0.019 8，较联网前的 0.010 9 联网后提高到了 0.019 8，提高了 0.008 9，但是仍在 0~0.02 之间。

模式 3 和 5 是西北电网机群之间的振荡，其中模式 5 阻尼为 0.018 9，相比联网前的 0.028 8 减小了 0.009 9，进入弱阻尼范围内。

联网后新增加了 3 个（模式 6~8）新疆电网机组相对于西北电网机组的大区域机群之间的振荡模式，阻尼均在 0~0.02 之间，属于弱阻尼振荡模式。

(2) 时域仿真表明，在大干扰下，联网后的新疆电网同样呈现出弱阻尼特性，220 kV 龟兹-轮胎 I 线龟兹侧发生三相永久故障扰动下新疆电网内部典型机组摇摆曲线如图 5 所示，机组之间接近等幅振荡。

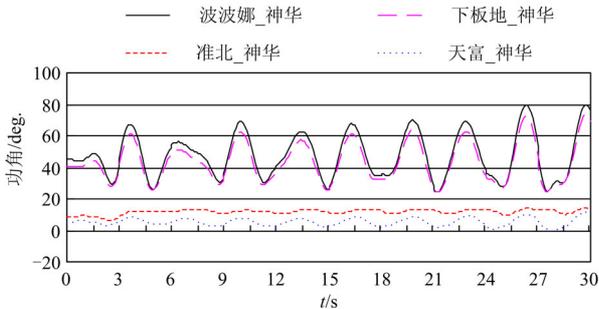


图 5 220 kV 龟兹-轮胎 I 线三相永久故障扰动下新疆电网典型发电机摇摆曲线

Fig.5 Curves of power angle swing of generators in Xinjiang power grid under three-phase permanent fault on 220 kV line I Qiuci-Luntai

联网后的西北电网在大干扰下机组之间出现长时间振荡不平复，陕甘断面一回联络线发生三相永久故障扰动下西北电网典型机组摇摆曲线如图 6 所示。

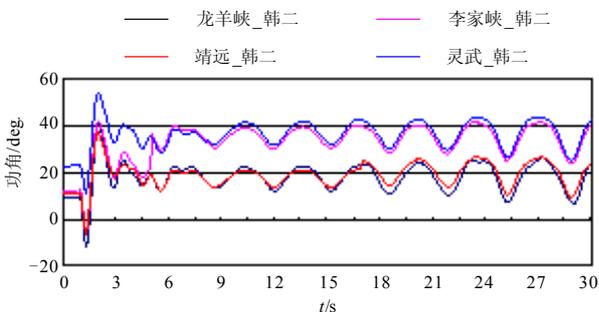


图 6 陕甘断面一回联络线三相永久故障扰动下西北电网典型发电机的摇摆曲线

Fig.6 Curves of power angle swing of generators in northwest power grid under three-phase permanent fault on one tie line between Shaanxi-Ganxu

新疆-西北电网在大干扰故障方式下，新疆电网机组与西北电网机组之间功角长时间振荡后开始发散，存在弱阻尼情况，陕甘断面一回联络线发生三相永久故障扰动下新疆-西北电网典型发电机的摇摆曲线如图 7 所示。

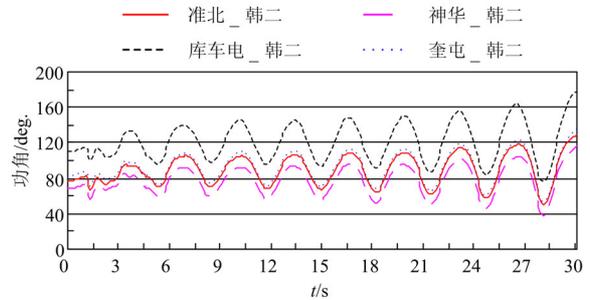


图 7 陕甘断面一回联络线三相永久故障扰动下西北电网典型发电机的摇摆曲线

Fig.7 Curves of power angle swing of generators in northwest power grid under three-phase permanent fault on one tie line between Shaanxi-Gansu

通过上述计算分析可以看出，2010 年新疆-西北电网联网后，新疆电网的动态品质有所提高；西北电网动态品质有所降低。同时，联网后还新增加了三个弱阻尼的区域振荡模式。时域仿真结果也表明联网后的系统存在弱阻尼的动态稳定问题。

#### 4 Prony 分析法校验联网前后主振模式

Prony 分析是通过分析信号获取系统模态的一种方法，它用指数函数的线性组合来拟合等间距采样数据。通过分析拟合，可以从给定输入信号下的响应曲线直接得到该曲线所包含振荡模式的频率、阻尼、幅值和相对相位<sup>[11]</sup>。

联网前新疆电网主导振荡模式 4 相关性最强的机组为波波娜水电，取波波娜水电-神华热电 1 号机和波波娜水电-苇湖梁 1 号机功角曲线进行 Prony 分析，如表 4 和表 5 所示。

从表 4 和表 5 可以看出，在波波娜水电-神华热电 1 号机功角曲线和波波娜水电-苇湖梁 1 号机功角曲线中所含的主振模式的频率是 0.22 Hz，与表 1 中模式 4 的频率相符。

表 4 波波娜水电-神华 1 号机功角曲线 Prony 分析

Tab.4 Prony analysis based result of power angle curve of

| Bobona-Shenhua generator 7 |      |        |       |       |
|----------------------------|------|--------|-------|-------|
| 模式                         | 振幅   | 衰减因子   | 频率/Hz | 阻尼比/% |
| 1                          | 1.54 | -2.536 | 0.227 | 1.02  |

表 5 波波娜水电-苇湖梁 1 号机功角曲线 Prony 分析  
Tab.5 Prony analysis based result of power angle curve of Bobona-Weihuliang generator 1

| 模式 | 振幅  | 衰减因子   | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|----|-----|--------|-------|-------|
| 1  | 2.9 | -2.937 | 0.224 | 1.03  |

联网前西北电网振荡模式 1 相关性最强的机组为蜀河 1 号机,取蜀河 1 号机-李家峡 1 号机和蜀河 1 号机-龙羊峡 1 号机功角曲线进行 Prony 分析, 如表 6 和表 7 所示。

表 6 蜀河 1 号机-李家峡 1 号机功角曲线 Prony 分析  
Tab.6 Prony analysis based result of power angle curve of Shuhe generator 1-Lijiaxia generator 1

| 模式 | 振幅   | 衰减因子   | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|----|------|--------|-------|-------|
| 1  | 6.94 | -0.259 | 0.67  | 2.91  |

表 7 蜀河 1 号机-龙羊峡 1 号机功角曲线 Prony 分析  
Tab.7 Prony analysis based result of power angle curve of Shuhe generator 1-Longyangxia generator 1

| 模式 | 振幅   | 衰减因子   | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|----|------|--------|-------|-------|
| 1  | 7.12 | -0.258 | 0.67  | 2.94  |

从表 6 和表 7 可以看出,在蜀河 1 号机-李家峡 1 号机功角曲线和蜀河 1 号机-龙羊峡 1 号机功角曲线中所含的主振模式的频率是 0.67 Hz, 与表 2 中模式 1 的频率相符。

联网后的新疆-西北电网振荡模式 8 相关性最强的机组为红电 1 号机,取红电 1 号机-神华 1 号机和红电 1 号机-龙羊峡 1 号机功角曲线进行 Prony 分析, 如 8 和表 9 所示。

表 8 红电 1 号机-神华 1 号机功角曲线 Prony 分析  
Tab.8 Prony analysis based result of power angle curve of Hongdian generator 1-Shenhua generator 1

| 模式 | 振幅    | 衰减因子   | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|----|-------|--------|-------|-------|
| 1  | 1.786 | -0.474 | 0.69  | 1.512 |

表 9 红电 1 号机-龙羊峡 1 号机功角曲线 Prony 分析  
Tab.9 Prony analysis based result of power angle curve of Hongdian generator 1-Longyangxia generator 1

| 模式 | 振幅    | 衰减因子   | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|----|-------|--------|-------|-------|
| 1  | 1.798 | -0.588 | 0.69  | 1.495 |

从表 8 和表 9 可以看出,在红电 1 号机-神华 1 号机功角曲线和红电 1 号机-龙羊峡 1 号机功角曲线中所含的主振模式的频率是 0.69 Hz, 与表 3 中模式 8 的频率相符。

### 5 增加联络线后阻尼特性的变化

按照电网规划,至 2015 年,新疆与西北电网省际间联络线将增加至 4 回 750 kV 线路。因此,以

2010 年的网架为基础,考虑将新疆电网与西北电网的联络线增加至 4 条,进行小干扰稳定分析和时域仿真,与 3.4 节中未增加联络线时的计算结果进行对比分析。

(1) 小干扰稳定分析结果如表 10 所示。

表 10 联网后西北-新疆电网的振荡模式  
Tab.10 Oscillation models after interconnection between Xinjiang grid and Northwest grid

| 模式序号 | 模式比                   | 频率/Hz | 阻尼比/% |
|------|-----------------------|-------|-------|
| 1    | -0.125 457+j3.679 103 | 0.59  | 3.41  |
| 2    | -0.158 217+j4.751 267 | 0.76  | 3.33  |
| 3    | -0.135 121+j4.401 348 | 0.71  | 3.07  |

由表 10 可知,增加联络线后的主导振荡模式阻尼比均大于 3%, 进入正常阻尼范围内。

(2) 时域仿真结果如下:

(a) 新疆电网 220 kV 龟兹-轮胎 I 线龟兹侧发生三相永久故障扰动下, 新疆典型机组摇摆曲线如图 8 所示。

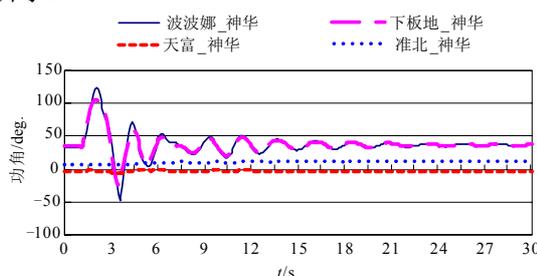


图 8 220 kV 龟兹-轮胎 I 线三相永久故障扰动下新疆电网典型发电机摇摆曲线

Fig.8 Curves of power angle swing of generators in Xinjiang power grid under three-phase permanent fault on 220 kV line I Qiuci-Luntai

(b) 陕甘断面一回联络线发生三相永久故障的大扰动, 西北电网典型发电机的摇摆曲线如图 9 所示。

(c) 陕甘断面一回联络线发生三相永久故障的大扰动,新疆-西北电网典型发电机的摇摆曲线如图 10 所示。

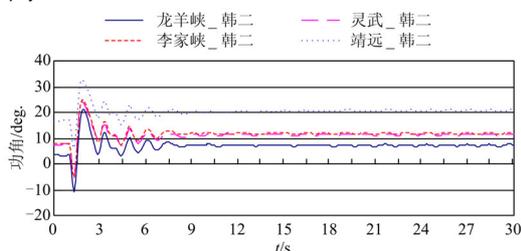


图 9 陕甘断面一回联络线三相永久故障扰动下西北电网典型发电机摇摆曲线

Fig.9 Curves of power angle swing of generators in Northwest grid under three-phase permanent fault on one tie line between Shaanxi-Gansu

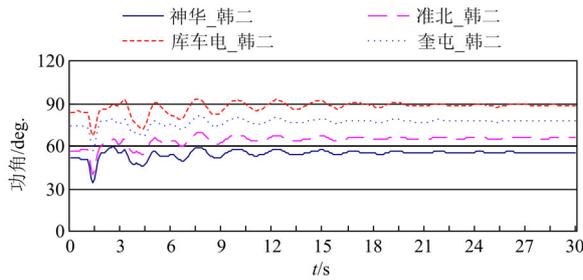


图 10 陕甘断面一回联络线三相永久故障扰动下新疆-西北电网典型发电机的摇摆曲线

Fig.10 Curves of power angle swing of generators in Xinjiang-Northwest power grid under three-phase permanent fault on one tie line between Shaanxi-Gansu

由上述曲线可以看出，增加联络线后，新疆-西北电网的系统阻尼特性得到明显改善，机组的功角曲线在经过一段时间振荡之后迅速平息恢复稳定，且振幅也较未增加联络线时小得多。

## 6 结论

本文对新疆-西北电网联网前后系统动态运行特性进行了分析计算，结果表明：对于大区电网互联系统，相对系统内电抗来说，较大的联络线电抗将显著降低联网系统的阻尼比，从而使整个互联系统的动态稳定性降低，增加联络线能有效地改善系统的阻尼特性。因此在考虑大区电网互联时应尽快加强互联电网间的网架结构，降低联络线电抗，以提高系统动态稳定性。因此，建议进一步加快新疆-西北电网联络线建设。在电网建设过渡期可考虑采用加装 PSS、降低联络线传输功率等方法抑制区域间的低频振荡。

## 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 Hong-guang, LIU Zeng-huang, 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] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 388-413.  
LIU Qu. Power system stability and generator excitation control[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007: 388-413.

[3] Kundur P. Power system stability and control[M]. Canada: CRC Press.

[4] 朱方, 汤涌, 张东霞, 等. 我国交流互联电网动态稳定性问题的研究及解决策略[J]. 电网技术, 2004, 28 (15): 1-5.

ZHU Fang, TANG Yong, ZHANG Dong-xia, et al. Study on dynamic stability problems of AC interconnected area power grids in China and their solutions[J]. Power System Technology, 2004, 28 (15): 1-5.

[5] 邓集祥, 贺建明, 姚天亮, 等. 大区联网条件下四川电网低频振荡分析[J]. 电网技术, 2008, 32 (17): 78-83.  
DENG Ji-xiang, HE Jian-ming, YAO Tian-liang, et al. Analysis of low frequency oscillation for Sichuan power grid in large scale interconnected power systems[J]. Power System Technology, 2008, 32 (17): 78-83.

[6] ZHU Fang, LIU Zeng-huang, CHU Liu. Achievement and experience of improving power system stability by PSS/excitation control in China[C]. //IEEE PES 2004 General Meeting. Denver(USA): 2004.

[7] 芦晶晶, 郭剑, 田芳, 等. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计[J]. 电网技术, 2004, 28 (15): 31-44.  
LU Jing-jing, GUO Jian, TIAN Fang, et al. Power system oscillation mode analysis and parameter determination of PSS based on Prony method[J]. Power System Technology, 2004, 28 (15): 31-44.

[8] Milanovic J V. Damping of the low-frequency oscillations of the generator dynamic interactions and the effectiveness of the controllers[J]. IEE Proc on Gener, Transm, and Distrib, 2002, 149 (6): 753-760.

[9] IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions definition and classification of power system stability[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (3): 1387-1401.

[10] 余贻鑫, 李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (11): 6-11.  
YU Yi-xin, LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (11): 6-11.

[11] 李杨楠, 刘文颖, 潘炜, 等. 西北 750 kV 电网动态稳定特性分析和控制策略[J]. 电网技术, 2007, 31 (12): 63-68.  
LI Yang-nan, LIU Wen-ying, PAN Wei, et al. Analysis of dynamic stability characteristics of 750 kV northwest China power grid and research on its control strategy[J]. Power System Technology, 2007, 31 (12): 63-68.

收稿日期: 2009-09-17; 修回日期: 2009-10-19

### 作者简介:

王佳明 (1985-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统分析、运行与控制; E-mail: wangjiaming138@163.com

刘文颖 (1955-), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析、运行与控制及电力系统智能调度研究工作;

牛拴保 (1978-), 男, 工程师, 从事电网生产调度工作。