

# 超低频区间振荡现象的机理分析

王青, 闵勇, 张毅威

(清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084)

**摘要:** 对我国东北、华北、华中、川渝电网的联网工程中出现的超低频区间振荡现象进行了深入的理论分析。提出区间振荡模式的特征值关于区间联系导纳的灵敏度的概念, 通过对该灵敏度的数学分析, 揭示了区间振荡频率受电网互联强弱的影响规律, 指出区间振荡频率将随电网互联的减弱而降低。同时阐明系统容量对区间联系导纳的影响, 在我国四大电网联网时由于系统容量较大, 使得区间联系导纳较小, 进而导致区间振荡频率较低, 出现了超低频现象。对四机两区系统和四大区域联网系统进行小干扰稳定计算, 比较并说明本文采用经典发电机模型近似复杂详细模型来定性研究区间振荡频率变化的方法的有效性, 并且验证了理论分析的正确性。

**关键词:** 区间振荡; 超低频; 特征值灵敏度; 小干扰稳定

**中图分类号:** TM712      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2006)12-0063-06

## 0 引言

区域电网互联是电网发展的客观要求, 也是大范围优化资源配置的必然趋势。我国电网的发展策略是“西电东送、南北互供、全国联网”, 到现在大区之间的同步联网已经经历了三个阶段: 2001年5月东北与华北电网联网, 2002年4月川渝与华中电网联网, 2003年9月实现了东北、华北、华中、川渝电网的交流互联, 形成了北起东北电网伊敏电厂, 南至川渝电网的二滩电厂, 地跨14个省市自治区, 装机容量超过1.4亿kW, 南北距离超过4600km的超大规模同步交流系统。

在四大电网联网工程的小干扰稳定计算和实际运行中都观察到超低频振荡现象, 即系统存在一个区间振荡模式 - 东北、华北电网的发电机组相对华中、川渝电网的发电机组的相对摇摆, 振荡频率在0.1~0.2 Hz之间<sup>[1]</sup>, 低于通常联网系统的区间振荡频率, 如东北与华北联网<sup>[1,2]</sup>、川渝与华中联网<sup>[1,3]</sup>时大区间的区间振荡频率在0.3 Hz左右, 故国内称之为超低频振荡。它是我国电网建设发展过程中的新现象, 有必要对其产生机理进行深入研究。目前已有的关于区间振荡受各种因素影响的分析方面的研究<sup>[4~7]</sup>, 多基于仿真试验的方法, 缺乏较为深入的理论分析。要对超低频振荡现象进行机理解释, 需要以比较严格的数学分析为基础。

本文针对区间振荡, 建立了两区互联系统的小

干扰稳定分析数学模型, 并通过数学推导, 对区间振荡频率受区间联系强弱的影响做了深入探讨, 进而给出了超低频区间振荡现象的机理解释。

## 1 互联系统小干扰稳定分析的数学描述

两个区域A区、B区通过联络线互联, 构成典型的区域互联系统。设全网有N台发电机, A区有m台, B区有N-m台。

为简化分析, 突出主要问题, 这里发电机采用二阶经典模型, 用暂态电抗后的电势恒定来近似励磁系统的作用, 用阻尼系数近似风阻、摩擦力等产生的机械阻尼和励磁绕组、阻尼绕组等产生的电气阻尼。负荷模型取恒阻抗, 系统的状态方程如式(1)所示<sup>[8]</sup>。

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中:  $\delta = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N]^T$  为发电机转子绝对角列向量;  $\omega = [\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N]^T$  为发电机转速列向量;  $M = \text{diag}\{M_1, M_2, \dots, M_N\}$  为发电机的惯性时间常数对角阵;  $D = \text{diag}\{D_1, D_2, \dots, D_N\}$  为发电机的阻尼常数对角阵;  $K = \frac{\partial P_e}{\partial \delta}$  为同步功率系数矩阵; I是N×N的单位阵; 0为N×N的零阵

$$\text{记: } -M^{-1}K = K_s \quad (2)$$

因电网实际运行条件下阻尼对振荡频率的影响一般不大, 这里发电机采用均匀阻尼来近似阻尼的

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50323002)

效果。本文的仿真算例表明,采用均匀阻尼的经典发电机模型的小干扰计算所得振荡频率与考虑详细发电机模型时的计算结果相比,数值上比较接近,定性的变化趋势上完全一致,在一定程度上可以认为,本文采用发电机经典模型进行推导分析的结论能够推广到发电机采用复杂详细模型时的情况。

$$\text{有: } -M^{-1}D = -K_d I, \text{ 其中 } K_d = \frac{D_i}{M_i}$$

设式(1)中机组排序顺序为:先是A区的 $m$ 台机组,而后是B区的 $N-m$ 台机组,令:

$$M = \begin{bmatrix} M_A & 0 \\ 0 & M_B \end{bmatrix}$$

其中:  $M_A = \text{diag}\{M_1, M_2, \dots, M_m\}$

$$M_B = \text{diag}\{M_{m+1}, M_{m+2}, \dots, M_N\}$$

$$K = \begin{bmatrix} K_{AA} & K_{AB} \\ K_{BA} & K_{BB} \end{bmatrix}$$

$$K_s = \begin{bmatrix} -M_A^{-1}K_{AA} & -M_A^{-1}K_{AB} \\ -M_B^{-1}K_{BA} & -M_B^{-1}K_{BB} \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} T_A & T_B \\ T_A & T_B \end{bmatrix}^T$$

## 2 矩阵特征值和特征向量的推导

### 2.1 $K_s$ 矩阵的特征值

对系统节点导纳矩阵  $Y_N$ ,通过变换消除负荷节点和中间联络节点,可得到收缩至发电机内电势的矩阵  $Y_G$ 。

$Y_G$  的元素:  $Y_{Gij} = G_{ij} + jB_{ij}$

发电机输出的有功功率为:

$$P_{Ei} = G_{ij} E_i^2 + E_i \sum_{j=1}^N E_j (B_{ij} \sin \delta_{ij} + G_{ij} \cos \delta_{ij}) = G_{ii} E_i^2 + E_i \sum_{j=1}^N E_j |Y_{Gij}| \sin \left( \delta_{ij} + \frac{\pi}{2} - \delta_j \right) \quad (i=1, 2, \dots, N)$$

其中:  $\delta_{ij} = \arctan \left( \frac{B_{ij}}{G_{ij}} \right)$  为互导纳角,

$$K_{ii} = E_i \sum_{j=1}^N E_j |Y_{Gij}| \cos \left( \delta_{ij} + \frac{\pi}{2} - \delta_j \right)$$

$$K_{ij} = -E_i E_j |Y_{Gij}| \cos \left( \delta_{ij} + \frac{\pi}{2} - \delta_j \right)$$

因一般运行条件下:  $\left| \delta_{ij} + \frac{\pi}{2} - \delta_j \right| < \frac{\pi}{2}$ , 有

$$K_{ii} > 0, K_{ij} < 0, \text{ 且有 } K_{ii} = \sum_{j=1}^N |K_{ij}|。$$

由式(2),  $K_s$  的元素:  $K_{s_{ii}} < 0, K_{s_{ij}} > 0$ , 且有

$$|K_{s_{ii}}| = \sum_{j=1}^N K_{s_{ij}}, K_s \text{ 是行主对角占优矩阵, 由}$$

Gerschgorin 圆盘定理<sup>[9]</sup>, 可推知  $K_s$  的所有特征值的实部都为非正数。

在经典发电机模型下的多机系统静态稳定分析中发现,在系统静态稳定条件下,  $K_s$  的特征值均为非正实数,随着系统由稳定过渡到不稳定,总先出现一个正实根<sup>[10]</sup>。

因此在静态稳定条件下,  $K_s$  特征值由一个 0 根和  $N-1$  个负实根构成。

### 2.2 $A_s$ 矩阵的特征值

系统矩阵的特征方程  $\det(A_s - I) = 0$

$$\text{即 } \det \begin{bmatrix} -I & I \\ K_s & (-K_d - I) \end{bmatrix} = 0$$

$$\text{有: } \det \begin{bmatrix} I & - \\ (-K_d - I) & K_s \end{bmatrix} = 0$$

由 Schur 定理<sup>[9]</sup>可得,  $|K_s - (-K_d)(-I)| = 0$ 。

对照  $K_s$  的特征方程,  $|K_s - \mu I| = 0$ ,

推得  $K_s$  的特征值  $\mu$  与系统矩阵  $A_s$  的特征值存在如下关系:

$$(-K_d + \mu) = \mu \quad (3)$$

$$\text{有: } \mu = \frac{-K_d \pm \sqrt{K_d^2 + 4\mu}}{2}$$

$\mu = 0$  时对应  $\mu = 0$  和  $K_d$ , 出现的 0 特征值是由于采用转子绝对角所致。

$\mu \neq 0$  时,在一般系统网络条件下,有  $K_d^2 + 4\mu < 0$ ,  $\mu = \frac{-K_d \pm j\sqrt{-K_d^2 - 4\mu}}{2}$

对应  $N-1$  对共扼复根,即  $N-1$  个机电振荡模式,特征值的实部表示振荡模式的衰减系数,虚部表示振荡频率。

### 2.3 $K_s$ 与 $A_s$ 矩阵的特征向量间的关系

#### 2.3.1 右特征向量

记  $A_s$  的特征值  $\mu_i$  对应的右特征向量为  $P_i$ , 有

$$A_s P_i = \mu_i P_i$$

$$\text{即: } \begin{bmatrix} 0 & I \\ K_s & -K_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_i \\ P_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_i \\ P_i \end{bmatrix}$$

得:  $P_i = \mu_i P_i$  (4)

$$K_s P_i - K_d P_i = \mu_i P_i$$

利用式(3),可推得:  $(K_s - \mu_i I) P_i = 0$ , 可见  $P_i$  为  $K_s$  的特征值  $\mu_i$  的右特征向量。因为  $K_s$  的特征值为实数,所以  $P_i$  为实数列向量。

### 2.3.2 左特征向量

记  $A_s$  特征值  $\mu_i$  对应的左特征向量为  $q_i$ , 有

$$q_i A_s = \mu_i q_i$$

其中:  $q_i = [q_{i1} \dots q_{in}]$

两边同时转置:  $A_s^T q_i^T = \mu_i q_i^T$

$$\text{其中: } q_i^T = \begin{bmatrix} q_{i1} \\ \vdots \\ q_{in} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_{i1}^T \\ \vdots \\ p_{in}^T \end{bmatrix}$$

$$\text{即: } \begin{bmatrix} 0 & K_s^T \\ I & -K_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} q_i^T \\ q_i^T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_i q_i^T \\ \mu_i q_i^T \end{bmatrix}$$

得:  $K_s^T q_i^T = \mu_i q_i^T$

$$(K_s^T - \mu_i I) q_i^T = 0 \quad (5)$$

利用式(3),可推得:  $(K_s^T - \mu_i I) q_i^T = 0$ 。

可见  $q_i^T$  为  $K_s^T$  的特征值  $\mu_i$  的右特征向量,也说明  $q_i^T$  为  $K_s$  的左特征向量。

式(5)两边同时转置,得:

$$q_i^T (K_s + K_d) = \mu_i q_i^T \quad (6)$$

因  $K_s$  的特征值为实数,所以  $q_i^T$  为实数行向量。

## 3 超低频区间振荡现象的机理分析

### 3.1 电网互联强弱对区间振荡频率的影响分析

为分析区间振荡模式的频率受电网互联强弱的影响变化规律,下面定义区间振荡模式特征值对区间联系导纳的灵敏度:

$$S_Y = \frac{\partial \lambda}{\partial Y_T}$$

其中:  $\lambda$  表示区间振荡模式的特征值,  $Y_T$  定义为区间联系导纳,  $Y_T = |Y_{Gij}| (i \in A, j \in B)$ , 是 A 区的任意发电机的内电势节点与 B 区的任意发电机的内电势节点之间的节点导纳的模,用来表征两区之间联系的强弱。

$$\text{有: } S_Y = \frac{\frac{\partial A_s}{\partial Y_T} P_T}{P_T} \quad (7)$$

其中:  $P_T, P_T$  分别为区间振荡特征值  $\lambda$  对应的左、右特征向量,由前面得到的式(4)、(6),有:

$$P_T = \begin{bmatrix} P_T^T \\ P_T^T \end{bmatrix} \\ P_T = \begin{bmatrix} (K_T + K_d) P_T \\ P_T \end{bmatrix}$$

$$\text{同时, } \frac{\partial A_s}{\partial Y_T} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{\partial K_s}{\partial Y_T} & 0 \end{bmatrix}, \frac{\partial K_s}{\partial Y_T} \text{ 中,除了 } (i, j)、(j, i)$$

元素外其他元素均为 0,而

$$\frac{\partial K_s}{\partial Y_T} (i, j) = \frac{1}{M_i} E_i E_j \cos \left( \delta_{ij} + \frac{\pi}{2} - \delta_i \right) > 0 \\ \frac{\partial K_s}{\partial Y_T} (j, i) = \frac{1}{M_j} E_i E_j \cos \left( \delta_{ji} + \frac{\pi}{2} - \delta_j \right) > 0$$

式(7)展开,最后整理可得:

$$S_Y = \frac{\frac{\partial K_s}{\partial Y_T} (j, i) p_{Ti} + \frac{\partial K_s}{\partial Y_T} (i, j) p_{Tj}}{j \sqrt{-K_d^2 - 4\mu} \cdot P_T} = jx$$

灵敏度的实部为 0,这是因采用均匀阻尼,特征值的实部为  $-K_d/2$  是个恒值所致。

小干扰稳定模态分析 (Mode shape) 中,常根据某个振荡模式的右特征向量中的转速项的大小和相位分布来确定该模态是由哪些机组参与,区间振荡模式则根据两群机组特征向量转速项相差近  $180^\circ$  来确定<sup>[11]</sup>。在本文的数学模型下,  $P_{Ti}, P_{Tj}$  都为实数向量,区间振荡模式反映在  $P_T, P_T$  上,有符号分布规律: A 区机组对应元素同号, B 区机组对应元素同号, A 区、B 区机组对应元素相互反号,这从后面四机两区算例中也可明显看出。

当  $P_T$  与  $P_T$  中元素符号分布完全相同时,不妨设 A 区机组对应元素都为正, B 区机组对应元素都为负,有:  $P_T P_T > 0, p_{Ti} < 0, p_{Tj} > 0, p_{Ti} < 0, p_{Tj} < 0$ , 可得:  $x > 0$ 。

当  $P_T$  与  $P_T$  中元素符号分布相反时,不妨设  $P_T$  中 A 区机组对应元素都为正, B 区机组对应元素都为负;  $P_T$  中 A 区机组对应元素都为负, B 区机组对应元素都为正,有:  $P_T P_T < 0, p_{Ti} > 0, p_{Tj} < 0, p_{Tj} > 0$ , 同样可得:  $x > 0$ 。

事实上在各种情况下,总有  $x > 0$ 。

说明区间振荡模式的频率随区间联系导纳的减小而降低,即随着两区之间联系的减弱而降低。

### 3.2 超低频区间振荡现象的分析

对于两区互联系统,一般区间联络线的容量远比系统容量小,联络线的阻抗值的大小是决定区间联系导纳大小的主要因素。假设区间联络线的阻抗有名值一定,若以一侧系统的容量  $S_1$  作为基准值,随着系统容量的增大,设新系统的容量为  $S_2$ ,则联络线在新的基准容量下的标幺值增大为  $S_2/S_1$  倍,在两侧系统容量增大很多的情况下,联络线标幺值将增大很多,对应着区间联系导纳将减小很多,使得

区间振荡的频率会随之降低。我国四大电网联网时,华北东北电网与华中川渝电网之间的联络线是一回 200 多公里的 500 kV 线路——辛嘉线,属于典型弱互联,同时华北、东北电网的装机容量以及华中、川渝电网的装机容量都较大,这样使得区间联系导纳会比较小,从而导致东北、华北电网对华中、川渝电网的区间振荡模式的振荡频率比较低,发生了超低频现象。

## 4 算例

### 4.1 四机两区系统

取四机两区系统为测试系统,其结构如图 1 所示,基本参数见文献 [12]。

在发电机采用经典模型,且为均匀阻尼时,假设

$\frac{D_i}{M_i} = 0.5 \text{ s}^{-1}$ ,两个区域内部发电和负荷各自平衡,区间联络线有功功率为 0。下面研究区间联系强弱对区间振荡频率的影响。

在区间联络线 7-8 双回、8-9 双回同时运行时,小干扰稳定计算得到 8 个特征值 (单位:  $\text{s}^{-1}$ ): 0、-0.5、-0.25 ±j8.189 8 (1.3034 Hz)、-0.25 ±j8.427 7 (1.341 3 Hz)、-0.25 ±j3.636 (0.578 68 Hz),后面三对共扼复根对应着三个机电振荡模式,对应的衰减系数的值与前面推导的结果一致。根据它们的特征向量,可知 1.303 4 Hz 模式对应 1、2 机之间的局部振荡,1.341 3 Hz 模式对应 3、4 机之间的局部振荡,0.578 68 Hz 对应 1、2 机对 3、4 机的区间振荡。区间振荡模式对应的左、右特征向量的元素如表 1 所示。

表 1 区间振荡模式对应左、右特征向量元素

Tab 1 Left and right eigenvectors for inter-area mode

	1	2	3	4
$P_T$	-0.526 45	-0.442 8	0.552 79	0.470 16
$T$	0.000 438	0.000 354	-0.000 436	-0.000 356
	+j0.006 37	+j0.005 14	-j0.006 34	-j0.005 17
	1	2	3	4
$P_T$	0.000 419	0.000 352	-0.000 44	-0.000 374
	-j0.006 09	-j0.005 12	+j0.006 4	+j0.005 44
$T$	0.550 06	0.444 53	-0.547 74	-0.446 85

在分别开断 7-8 一回线,开断 7-8、8-9 各一回线时计算得到的机电振荡模式的特征值如表 2 所示。区间振荡模式的振荡频率随两区联系的减弱而降低,这与前面理论分析的结论一致。

下面发电机采用详细 6 阶模型进行小干扰计算分析,以便与取经典模型时的结果进行对比,此时发

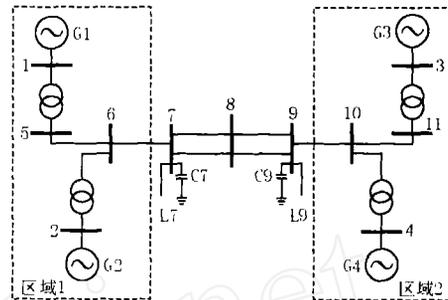


图 1 四机两区系统结构图

Fig 1 4-generator 2-area interconnected system

电机的阻尼系数都取为 0。

分别进行在区间联络线 7-8 双回、8-9 双回同时运行,7-8 单回、8-9 双回运行,7-8 单回、8-9 单回运行时的小干扰稳定计算,每次计算都得到 24 个特征值,根据频率范围和特征向量特点可以判断其中有机电振荡模式三个,如表 3 所示。

表 2 经典发电机模型下特征值表

Tab 2 Eigenvalues of electromechanical oscillatory modes

with classical generator model

	区域 1 局部振荡	区域 2 局部振荡	区间振荡
7-8 双回	-0.25 ±j8.189 8	-0.25 ±j8.427 7	-0.25 ±j3.636
8-9 双回	(1.303 4 Hz)	(1.341 3 Hz)	(0.578 68 Hz)
7-8 单回	-0.25 ±j8.174	-0.25 ±j8.404 1	-0.25 ±j3.113 6
8-9 双回	(1.300 9 Hz)	(1.337 6 Hz)	(0.495 55 Hz)
7-8 单回	-0.25 ±j8.167	-0.25 ±j8.387 1	-0.25 ±j2.760 1
8-9 单回	(1.299 8 Hz)	(1.334 9 Hz)	(0.439 28)

表 3 详细发电机模型下特征值表

Tab 3 Eigenvalues of electromechanical oscillatory modes

with detailed generator model

	区域 1 局部振荡	区域 2 局部振荡	区间振荡
7-8 双回	-0.789 9 ±j7.257	-0.819 ±j7.464	-0.099 9 ±j3.731
8-9 双回	(1.154 9 Hz)	(1.188 0 Hz)	(0.593 82 Hz)
7-8 单回	-0.791 ±j7.231	-0.813 ±j7.449	-0.085 ±j3.245 5
8-9 双回	(1.150 8 Hz)	(1.185 6 Hz)	(0.516 53 Hz)
7-8 单回	-0.790 ±j7.224	-0.814 ±j7.425	-0.083 6 ±j2.91
8-9 单回	(1.149 7 Hz)	(1.181 6 Hz)	(0.463 09 Hz)

比较发电机采用经典模型和详细模型时的计算结果,经典模型条件下局部振荡模式的频率值略大一些,偏差在 13.1% 以内,区间振荡模式的频率值略小一些,偏差在 5.2% 以内。采用两种发电机模型计算得到的振荡模式的频率,尤其是区间振荡模式的频率是比较接近的,并且两种发电机模型下区间振荡频率随电网互联减弱而降低的变化趋势是完全一致的,在一定程度上可以说明本文发电机采用经典模型来近似详细模型来定性研究区间振荡模式

的频率受电网互联强弱影响的方法的有效性。

#### 4.2 东北、华北、华中、川渝电网互联系统

取某年东北、华北、华中、川渝电网互联系统的规划数据来进行小干扰稳定分析,研究区间振荡模式的频率受区间联络强弱的影响。算例中取东北、华北、华中、川渝电网均同步互联的运行方式,全网发电机出力 162 929.7 MW,负荷 159 190.82 MW,华中电网通过区间联络线 500 kV 单回辛安 - 获嘉线路向华北电网输送 600MW 功率。全系统有 5 764 条母线,842 台发电机。发电机采用详细模型,计及发电机的控制,包括调速器、励磁器,部分发电机安装了 PSS。计算软件采用中国电科院的综合程序 (PSASP),利用迭代法转 Rayleigh 商迭代法求解特征值<sup>[13]</sup>。

小干扰稳定计算求得东北、华北电网机组对华中、川渝电网机组的区间振荡模式,对应特征值为  $-0.019\ 092 + j1.047\ 951$ ,频率为 0.166 787 Hz。

辛安 - 获嘉联络线增加为两回,其他条件不变时,该区间振荡模式的特征值变为:  $-0.005\ 325 + j1.131\ 469$ ,对应频率为 0.180 079 Hz,频率增高。

如果将发电机改用经典模型,分别计算辛安 - 获嘉联络线单回和双回时的东北、华北电网机组对华中、川渝电网机组的区间振荡模式,得到的频率分别为 0.158 166 Hz 和 0.167 935 Hz,从变化趋势上与发电机采用详细模型时的结果完全一致。

东北、华北、华中、川渝电网互联的算例同样反映了区间振荡模式的振荡频率受两区联系强弱影响的规律。

## 5 结论

本文以我国东北、华北、华中、川渝电网联网时出现的超低频区间振荡现象为研究背景,对区间振荡频率受电网互联强弱的影响做了深入的分析。通过定义区间振荡模式的特征值关于区间联系导纳的灵敏度,推证了区间振荡频率随两区之间联系的减弱而降低。进一步,分析了系统容量对区间联系导纳大小的影响,说明四大电网联网时由于系统的容量较大使得区间联系导纳较小,导致区间振荡频率较低,从而对超低频区间振荡现象做了机理解释。四机两区系统和东北、华北、华中、川渝联网系统的小干扰稳定分析,验证了理论分析的正确性。

### 参考文献:

[1] 朱方,汤涌,张东霞,等. 我国交流互联电网动态稳定

性的研究及解决策略 [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.

[2] 汤涌,朱方,张东霞,等. 华北 - 东北联网工程系统调试试验 [J]. 电网技术, 2001, 25(11): 46-49.

TANG Yong, ZHU Fang, ZHANG Dong-xia, et al Commissioning Tests of Interconnection of North China Power Grid with Northeast China Power Grid [J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 46-49.

[3] 汤涌,李晨光,朱方,等. 川电东送工程系统调试 [J]. 电网技术, 2003, 27(12): 14-21.

TANG Yong, LI Chen-guang, ZHU Fang, et al Commissioning Tests for Transmission Project of Power Transport from Sichuan to Eastern Area of China [J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 14-21.

[4] Klein M, Rogers G J, Kundur P. A Fundamental Study of Inter-area Oscillations in Power Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(3): 914-921.

[5] 鲍燕康, Glavitsch H. 电力系统特征值分类和区域振荡控制 [J]. 电力系统自动化, 1994, 18(6): 11-18.

BAO Yan-kang, Glavitsch H. Eigenvalue Classification and Inter-area Oscillation Control in Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(6): 11-18.

[6] So P L, Macdonald D C. Analysis and Control of Inter-area Oscillations for Security Enhancement [A]. Fourth International Conference on Power System Control and Management London: 1996 16-18.

[7] Bachmann U. Analysis of Interarea Oscillations in the European Electric Power System in Synchronous Parallel Operation with the Central-European Networks [A]. Proceedings of 1999 PowerTech Conference Hungary (Budapest): 1999.

[8] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002.

NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin Theory and Its Analysis for Dynamic Power System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

[9] 现代数学手册编纂委员会. 现代数学手册 经典数学卷 [M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2000.

Mordem Mathematics Compilation Group. Mordem Mathematics—Classic Mathematic [M]. Wuhan: Huazhong Science and Technology Press, 2000.

[10] 西安交通大学,等. 电力系统计算 [M]. 北京:水利电力出版社, 1978.

Xi an Jiaotong University, et al Power System Calcula-

- tion [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1978.
- [11] Graham R. Power System Oscillations [M]. Norwell (USA): Kluwer Academic Publishers, 2000.
- [12] Kunder P. Power System Stability and Control, Reprint [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [13] 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序 PSASP6.1 小干扰稳定分析用户手册 [Z]. 北京: 中国电力科学研究院.  
Electric Power Research Institute. Synthetical Procedure for Power System Analysis PSASP6.1 Small Disturbance Stability Analysis [Z]. Beijing: Electric Power Research

Institute

收稿日期: 2005-12-13; 修回日期: 2005-12-31

作者简介:

王青 (1974 -), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统安全稳定分析; E-mail: wangqing03@mails.tsinghua.edu.cn

闵勇 (1963 -), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统稳定分析与控制;

张毅威 (1961 -), 女, 博士, 研究方向为电力系统稳定分析与控制。

### Mechanism analysis of ultra low frequency inter-area oscillation

WANG Qing, MIN Yong, ZHANG Yi-wei

(State Key Lab of Power Systems, Dept of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** During the process of the interconnection of Northeast China Power Grid, North China Power Grid, Central China Power Grid and Chuan-Yu Power Grid, there appeared ultra low frequency inter-area oscillation. The mechanism of this phenomenon is studied in this paper. Eigenvalue sensitivity with respect to inter-area transfer admittance is defined and deduced, which manifests the influence of the power grid interconnection tightness on inter-area oscillation frequency. Moreover, the effect of system installation capacity on inter-area transfer admittance is analyzed. The giant system installation capacity of the above four power grids makes the inter-area transfer admittance much smaller, which puts the inter-area oscillation frequency lower and leads to the appearance of ultra low frequency oscillation. Two illustrative examples, i.e. four-generator two-area system and the interconnection system of the above four major power grid, are adopted to verify the validity of the theoretical analysis.

**Key words:** inter-area oscillation; ultra low frequency; eigenvalue sensitivity; small signal stability

(上接第 56 页 continued from page 56)

- [9] 王克英, 穆钢, 韩学山, 等. 使潮流方程直接可解的 PMU 配置方案 [J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(10): 14-19.  
WANG Ke-ying, MU Gang, HAN Xue-shan, et al. Placement of Phasor Measurement Unit for Direct Solution of Power Flow [J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(10): 14-19.
- [10] 李胜芳, 范春菊, 郁惟镛. 一种基于 PMU 的线路自适应故障测距算法 [J]. 继电器, 2004, 32(10): 6-9.

LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong. An Adaptive Fault Location Algorithm Based on PMU for Transmission on Line [J]. Relay, 2004, 32(10): 6-9.

收稿日期: 2005-10-27; 修回日期: 2006-03-20

作者简介:

李川江 (1982 -), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: albertlcj@163.com

邱国跃 (1958 -), 男, 副教授, 研究生导师, 研究方向为电力系统运行与控制及人工智能等。

### Optimal placement algorithm of PMU based on enhanced particle swarm optimization during the increase of PMUs

LI Chuan-jiang, QIU Guo-yue

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

**Abstract:** Aiming at the existing optimal placement problem of PMU in the power system, this paper further considered the condition that the number of PMUs increase in the development of power system. Taking the observability of whole system as constraint condition and maximal measurement redundancy of measured quantities as the objectives, by using a topological analysis method, the optimization model of placement of PMU was formed based on linear measurement model of power system. Moreover, adopting the enhanced particle swarm optimization (EPSO), the optimal placement of PMU was achieved in the process of the increase of installation number. The numerical examples show that the algorithm is effective and reliable.

**Key words:** observability analysis; phasor measurement unit (PMU); particle swarm optimization (PSO)