

# 电力系统阻尼特性分析与研究

郝正航, 邱国跃, 陈卓, 许克明

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

**摘要:** 分别从单机、多机电力系统线性化状态空间模型出发,证明了线性反馈励磁条件下,开环和闭环系统的总阻尼相等、轻载和重载工况下总阻尼相等,即一般电力系统具有阻尼守恒性。通过分析影响总阻尼的诸多因素,得出快速励磁是提供系统强阻尼主要保证,特征值计算和动态仿真证实了快速励磁可以显著改善电力系统小干扰稳定性。由于在不同负荷水平下,系统的总阻尼保持不变,所以只要励磁校正恰当,重负荷不会恶化系统阻尼。最后基于阻尼守恒性,指出在电力系统尤其是多控制器复杂电力系统中存在阻尼竞争现象,阻尼协调既非常必要又有较大难度。

**关键词:** 电力系统; 阻尼特性; 快速励磁; 动态稳定; 小干扰稳定

**中图分类号:** TM761 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)23-0019-06

## 0 引言

随着现代电力系统规模的迅速扩大,大区联网乃至全国联网的逐步进行,人们对电力系统的阻尼特性有了更高的重视。特别是近几年,全国几个大区电网都曾不同程度地发生低频振荡事故,虽未造成灾难,但其潜在的隐患已使人们深感担忧。对现代电力系统阻尼特性深入研究很有必要。

长期以来,“长线路、重负荷和快速励磁”一直认为是低频振荡的主要原因<sup>[1,3]</sup>。但本文从电力系统总阻尼出发,从机理上重新认识了阻尼特性和阻尼变化规律。指出了快速励磁是提供系统强阻尼的主要保证,和慢速励磁系统相比,快速励磁可以提供显著的强阻尼,它应该成为提高小干扰稳定性的主要手段。通过对单机系统和多机系统的计算分析与仿真研究证明了这一点。同时得出在重负荷运行方式下,电力系统的总阻尼不可能降低,和轻负荷下具有相等的总阻尼指标,只要附加励磁校正得当,其闭环系统动态特性和轻负荷时基本相同,阻尼不会恶化。

电力系统在一定条件下具有阻尼守恒性,这将导致电力系统动态行为中存在阻尼竞争现象,应该通过有效的阻尼协调手段合理分配阻尼。在总阻尼指标偏低且仅靠阻尼协调不能奏效时,须考虑增加系统总阻尼的其他途径。

## 1 电力系统的恒定总阻尼

### 1.1 单机无穷大系统的恒定总阻尼

考察单机无穷大系统的状态方程(式1),符号名称和意义见文献[4,5]。

$$\begin{bmatrix} \dot{E}_q \\ \dot{E}'_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\frac{S_E}{H} & -\frac{D}{H} & -\frac{R_E}{H} & 0 \\ \frac{S_E - S'_E}{T_{d0} R_E} & 0 & -\frac{1}{T_d} & \frac{1}{T_{d0}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_e} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_q \\ E'_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{T_e} \end{bmatrix} u \quad (1)$$

写成矩阵形式

$$\dot{X} = AX + BU$$

式(1)表达的单机无穷大系统模型中,发电机采用三阶模型,励磁单元采用一阶模型,故状态矩阵为4阶,当系统开环时(手动励磁)特征根为4个,它们是矩阵A的4个特征值,设为,

$$s_i = -\sigma_i + j\omega_i, \quad i = 1, 2, 3, 4$$

由代数理论知,方阵的全部特征根之和也即特征值实部之和(共轭特征根虚部抵消),而且等于对角元素之和。即,

$$\sum_{i=1}^4 \sigma_i = -\left( -\frac{D}{H} - \frac{1}{T_d} - \frac{1}{T_e} \right) = \frac{D}{H} + \frac{1}{T_d} + \frac{1}{T_e} \quad (2)$$

某一特征值的实部 $\sigma_i$ 称为该模式的阻尼,根据文献[6]可定义 $\sum_{i=1}^4 \sigma_i$ 为开环系统总阻尼。式(2)表明,开环系统总阻尼 $\sum_{i=1}^4 \sigma_i$ 为常数,这一常数仅仅决定于系统的结构参数,影响系统总阻尼的结构参数有

4个:阻尼系数  $D$ 、转子惯性时间常数  $H$ 、定子闭路励磁时间常数  $T_d'$ 和励磁机时间常数  $T_e$ 。当采用状态反馈构成闭环系统时,闭环系统的特征根也是4个,它们是矩阵  $(A+BK)$ 的特征值,同理得出,闭环系统总阻尼也为常数,而且不反馈励磁电压时,和开环系统总阻尼相等。

1.2 多机电力系统的恒定总阻尼

由 heffron - philips多机系统传递函数模型<sup>[7]</sup>,根据控制理论关于传递函数转换状态方程的方法,推出  $N$ 机系统状态方程组如下:

$$\dot{X}_N = A_N X_N + B_N V_N \tag{4}$$

其中

$$X_N = [ \dots, E_{q1}, E_{fd1}, \dots, E_{qn}, E_{fdn} ]^T$$

$$A_N = \begin{bmatrix} 0 & 2f_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{11i}}{M_i} & -\frac{D_i}{M_i} & \frac{K_{21i}}{M_i} & 0 & \dots & -\frac{K_{11j}}{M_i} & 0 & -\frac{K_{21j}}{M_i} & 0 & \dots & -\frac{K_{11n}}{M_i} & 0 & -\frac{K_{21n}}{M_i} & 0 & \dots & -\frac{K_{11n}}{M_i} & 0 & -\frac{K_{21n}}{M_i} & 0 \\ -\frac{K_{31i}}{T_{d0i}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0i}K_{31i}} & -\frac{1}{T_{d0i}} & \dots & -\frac{K_{41j}}{T_{d0i}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0i}K_{31j}} & 0 & \dots & -\frac{K_{41n}}{T_{d0i}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0i}K_{31n}} & 0 & \dots & -\frac{K_{41n}}{T_{d0i}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0i}K_{41n}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{e1}} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 2f_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{1ji}}{M_i} & 0 & -\frac{K_{2ji}}{M_i} & 0 & \dots & -\frac{K_{1ji}}{M_i} & -\frac{D_i}{M_i} & -\frac{K_{2ji}}{M_i} & 0 & \dots & -\frac{K_{1jn}}{M_i} & 0 & -\frac{K_{2jn}}{M_i} & 0 & \dots & -\frac{K_{1jn}}{M_i} & 0 & -\frac{K_{2jn}}{M_i} & 0 \\ -\frac{K_{3ji}}{T_{d0i}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0i}K_{3ji}} & 0 & \dots & -\frac{K_{4ji}}{T_{d0i}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0i}K_{3ji}} & 0 & \dots & -\frac{K_{4jn}}{T_{d0i}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0i}K_{3jn}} & 0 & \dots & -\frac{K_{4jn}}{T_{d0i}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0i}K_{4ji}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{ei}} & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 2f_0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{1ni}}{M_n} & 0 & -\frac{K_{2ni}}{M_n} & 0 & \dots & -\frac{K_{1ni}}{M_n} & 0 & -\frac{K_{2ni}}{M_n} & 0 & \dots & -\frac{K_{1nn}}{M_n} & 0 & -\frac{K_{2nn}}{M_n} & 0 & \dots & -\frac{K_{1nn}}{M_n} & -\frac{D_n}{M_n} & -\frac{K_{2nn}}{M_n} & 0 \\ -\frac{K_{3ni}}{T_{d0n}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0n}K_{3ni}} & 0 & \dots & -\frac{K_{4ni}}{T_{d0n}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0n}K_{3ni}} & 0 & \dots & -\frac{K_{4nn}}{T_{d0n}} & 0 & -\frac{1}{T_{d0n}K_{3nj}} & 0 & \dots & -\frac{K_{4nn}}{T_{d0n}} & -\frac{D_n}{M_n} & -\frac{1}{T_{d0n}K_{3nn}} & -\frac{1}{T_{d0n}} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{en}} \end{bmatrix}$$

$$B_N = \text{blockdiag} \left\{ \left[ 0, 0, 0, \frac{K_{ei}}{T_{ei}} \right] \right\}$$

$$V_N = [V_{s1}, V_{s2}, \dots, V_{sN}]^T$$

设  $A_N$ 的特征根为:  $\lambda_i (\lambda_{i-1}) = \lambda_i \pm j \omega_i, i = 1, 2, \dots, 4N$ 。根据 1.1节总阻尼的定义和计算方法可得多机系统开环总阻尼  $\sum_{M0}$

$$\sum_{M0} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{4n} = \lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \lambda_{4N} = \sum_{i=1}^N \left( -\frac{D_i}{M_i} - \frac{1}{T_{d0i}K_{3ii}} - \frac{1}{T_{ei}} \right) \tag{5}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{qi} &= -\frac{K_{4il}}{T_{d0i}} E_{q1} - \dots - \frac{K_{4il}}{T_{d0i}} E_{qn} \\ \frac{1}{T_{d0i}K_{3ii}} \dot{E}_{qi} &= -\frac{1}{T_{d0i}} E_{fdi} - \dots - \frac{K_{4ij}}{T_{d0i}} E_{qj} - \frac{1}{T_{d0i}K_{3ij}} \dot{E}_{qj} - \dots - \frac{K_{4in}}{T_{d0i}} E_{qn} \\ \dot{E}_{fdi} &= -\frac{1}{T_{ei}} E_{fdi} + \frac{K_{ei}}{T_{ei}} V_{si} \end{aligned} \tag{3}$$

$i = 1, 2, \dots, n, \quad j = 1, 2, \dots, n$

根据以上一阶微分方程组,可写出  $N$ 机系统状态方程的矩阵式

$$\dot{X}_N = A_N X_N + B_N V_N \tag{4}$$

其中

$$X_N = [ \dots, E_{q1}, E_{fd1}, \dots, E_{qn}, E_{fdn} ]^T$$

式中:  $D_i, M_i, T_{ei}$ 是第  $i$ 台机的阻尼系数、转子惯性时间常数、励磁机时间常数。  $T_{d0i}K_{3ii}$ 是从第  $i$ 台机励磁绕组向整个电力系统看进去的时间常数,不难分析它是基本不变的,故总阻尼基本不变。在重负荷时,由于负荷节点对地阻抗减小,  $T_{d0i}K_{3ii}$ 略有减小,进而导致系统总阻尼有微小增长,由于增长的百分率很小,可以认为基本守恒。

当采用状态反馈构成闭环系统时,设反馈增益阵为  $K_N$ ,闭环系统的特征根也是  $4N$ 个,它们是矩阵  $A_N + B_N K_N$ 的特征值,同理得出,闭环系统总阻尼也

为常数,而且当不反馈励磁电压时,和开环系统总阻尼相等。

综上所述,多机系统阻尼守恒有两层含义:在某一运行点上,线性反馈励磁不改变系统总阻尼,总阻尼严格守恒;在一定控制参数下,运行工况变化时,总阻尼基本守恒。

## 2 快速励磁是提供强阻尼的主要保证

长期以来,人们认为快速励磁是引起低频振荡的主要原因之一,事实上,治理低频振荡还要依靠快速励磁。由式(2.5)可见,影响开环系统总阻尼的参数有4个,但是起主要作用的是励磁机时间常数 $T_e$ ,其余3个参数的影响甚小。虽然系统总阻尼的大小并不直接决定机电模式阻尼的大小或小干扰稳定性,但是应该把系统总阻尼作为一种阻尼资源来认识。研究发现,在系统总阻尼过小的情况下,无论采取何种附加励磁手段,都无法同时得到理想的机电模式强阻尼和理想的电压调节性能。为了比较快速励磁和慢速励磁的阻尼作用,分别以单机无穷大系统和多机系统为例,进行分析和仿真。

### 2.1 单机无穷大系统的分析与仿真

为说明励磁系统时间常数 $T_e$ 对系统阻尼特性的重大影响,首先以单机无穷大系统为例进行分析。(系统接线图略)系统参数: $X_d = X_q = 1.76$ ,  $X_d' = 0.3$ ,  $X_T = 0.1$ ,  $X_L = 0.55$ ,  $H = 6.0$ ,  $T_{d0} = 8.0$ 。

表1给出了单机无穷大系统不同励磁时间常数( $T_e$ )时系统特征根的比较。设慢速励磁的等效 $T_e$ 为0.6s,快速励磁的 $T_e$ 为0.1s。这里的闭环系统装设的是按文献[4]方法设计的最优励磁控制器。

表1 单机系统不同励磁时间常数时系统特征根

Tab 1 Eigenvalue of simple power system with different excitation parameter

$T_e = 0.6 \text{ s}$		$T_e = 0.1 \text{ s}$	
开环系统特征值	闭环系统特征值	开环系统特征值	闭环系统特征值
(总阻尼 - 1.983 8)	(总阻尼 - 1.983 8)	(总阻尼 - 10.317 1)	(总阻尼 - 10.317 1)
- 0.139 5 ± 133 3i	- 0.714 1 ± 9.011 8i	- 0.139 5 ± 133 3i	- 4.789 7 ± 17.258 5i
- 0.038 2	- 0.277 8 ± 149 7i	- 0.038 2	- 0.368 9 ± 654 3i
- 1.666 7		- 10.000 0	

可见,在 $T_e = 0.6 \text{ s}$ 时,总阻尼仅有-1.983 8,由于总阻尼绝对值较小,即使采用最优化设计,也不能把所有特征值配置在复平面虚轴以左较远处。而在 $T_e = 0.1 \text{ s}$ 时,系统总阻尼可达-10.317 1,使得系统的机电模式和电磁模式都可能获得较大的阻尼,因此充足的总阻尼是系统稳定的保证,而励磁规律优化须在总阻尼裕度较大的前提下进行,才能得到满意的效果。

由于动态稳定和暂态稳定往往有一致的表现,故本文在给出的小干扰稳定分析的同时,也给出相应的非线性暂态仿真结果。模拟输电线路中部三相瞬间短路,0.2 s故障清除,图1和图2为功角暂态响应和电压暂态响应。可见,快速励磁下的功角及电压摇摆特性均显著优于慢速励磁。

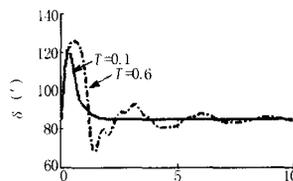


图1 功角暂态响应

Fig 1 Angle  $\delta$  transient responses of generator

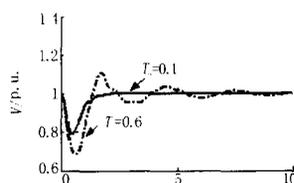


图2 端电压暂态响应

Fig 2 Voltage  $v$  transient responses of generator

### 2.2 多机系统的分析与仿真

在多机系统中可以得到同单机系统类似的结论。以两区域4机系统为例(图3)。系统参数见文献[8]。表2给出了 $T_e$ 为0.5s和0.1s时系统的开环特征根和闭环特征根。表2中的闭环系统装设的是按文献[5]方法设计的分散协调最优励磁控制器,反馈量为机端电压、转子角速度和电磁功率。

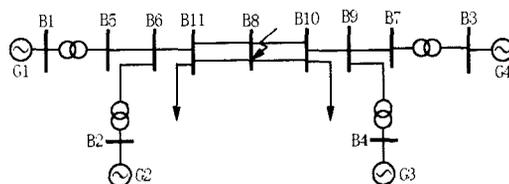


图3 4机测试系统

Fig 3 A four-machine system

由表2可见,当 $T_e = 0.5 \text{ s}$ 时,系统总阻尼为-9.448,开环系统有一个弱阻尼模式-0.136 3 ± 8.328 5i,经分散协调最优控制器校正之后,闭环系统弱阻尼模式消失,但与机电模式相关的特征值只能左移至-0.3附近,受总阻尼的限制,不能左移更多。而当 $T_e = 0.1 \text{ s}$ 时,系统总阻尼为-41.45,经分散协调最优控制器校正之后,主模式特征根左移至-0.9以左,其余模式更加远离虚轴,阻尼裕度很大。可

见快速励磁表现出强阻尼优势。快速励磁的强阻尼优势在大干扰下(暂态稳定)也有体现。图4至图7分别是相同故障条件下,快、慢速励磁下的功角、电压暂态响应,易见快速励磁的阻尼优势是显著的。

表2 多机系统不同励磁时间常数时的系统特征根

Tab 2 Eigenvalue of complex power system with different excitation parameter

$T_e = 0.5\text{ s}$		$T_e = 0.1\text{ s}$	
开环系统特征值	闭环系统特征值	开环系统特征值	闭环系统特征值
(总阻尼 - 9.448)	(总阻尼 - 9.448)	(总阻尼 - 41.45)	(总阻尼 - 41.45)
-0.1363 ± j0.3285i	-0.2347 ± j0.5450i	-0.1363 ± j0.3285i	-4.5062 ± j4.7341i
-0.1424 ± j0.5609i	-0.3243 ± j0.5062i	-0.1424 ± j0.5609i	-4.3207 ± j1.9085i
-0.1269 ± j0.7455i	-0.8228 ± j0.8292i	-0.1269 ± j0.7455i	-2.6425 ± j2.3518i
-0.2503	-0.4783 ± j0.4831i	-0.2503	-2.4864 ± j2.2111i
-0.1904	-0.5843 ± j0.6363i	-0.1904	-0.9377 ± j0.9708i
-0.1815	-0.8936 ± j0.2433i	-0.1815	-2.5572 ± j0.3868i
-0.0118	-0.9052 ± j0.2026i	-0.0118	-2.7397 ± j0.3247i
-0.0029	-0.9617	-0.0029	-1.0673
-2.0000 (4个)		-10.0000 (4个)	

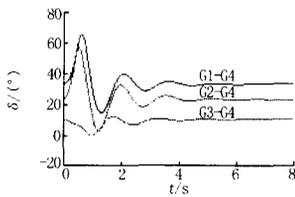


图4 功角暂态响应 ( $T_e = 0.1$ )

Fig 4 Angle  $\delta$  transient responses of generator ( $T_e = 0.1$ )

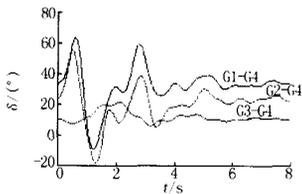


图5 功角暂态响应 ( $T_e = 0.5$ )

Fig 5 Angle  $\delta$  transient responses of generator ( $T_e = 0.5$ )

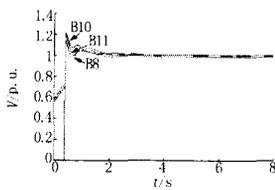


图6 端电压暂态响应 ( $T_e = 0.1\text{ s}$ )

Fig 6 Voltage  $\delta$  transient responses of generator ( $T_e = 0.1$ )

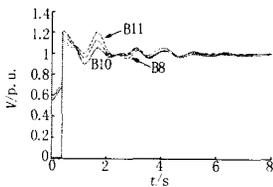


图7 端电压暂态响应 ( $T_e = 0.5\text{ s}$ )

Fig 7 Voltage  $\delta$  transient responses of generator ( $T_e = 0.5$ )

由此可见,常规慢速励磁系统才是真正不可忽视的弱(负)阻尼隐患,这一点必须引起人们的注意。我国台湾电力系统大部分机组装设慢速励磁,却曾经在9年当中发生16次低频振荡事故<sup>[9]</sup>,那么本节的分析可以成为这一历史实例的机理解释。

### 3 负荷轻重与动稳定没有必然联系

一般认为,重负荷是降低系统阻尼引起低频振荡的运行因素。但是,从本文1节的理论证明得出:单机系统总阻尼与负荷轻重无关,仅和系统的结构参数有关,多机系统在重负荷下总阻尼不但没有削弱,甚至有少量增长。因此重负荷工况恶化阻尼不是定论。表3给出了图3多机系统轻载和重载2种运行工况下的全部特征值。轻载工况时,系统总负荷为2452MW,联络线有功功率为379MW;重载工况下,系统总负荷为2819MW,联络线有功功率为638MW。表3显示,轻载方式时,系统总阻尼为-41.491;在重载方式时,系统总阻尼和轻载方式基本相同而略有增加。由此认识可以得出,只要控制器参数协调得当,在负荷高峰和低谷应该具有相同的动态特性和阻尼裕度,而不会在重负荷条件下恶化阻尼引起功率振荡。重负荷时,虽然开环系统出现了一个负阻尼模式0.0274,但总阻尼保持不变,有可能通过附加励磁校正得到和轻载方式相同的闭环动态特性,表3的计算结果证明了确实如此。仍然假设发电机均装有分散协调最优励磁调节器,在轻载工况下,机电振荡主导模式为-0.8977 ± 4.0014i,在重载工况下,机电振荡主导模式为-0.9073 ± 3.7144i。可见,重载和轻载相比,重载下的小干扰稳定性没有任何恶化趋势,甚至优于轻载工况。

表3 多机系统不同负荷状况时系统的特征值

Tab 3 Eigenvalue of complex power system on different load conditions

轻载工况		重载工况	
开环系统特征值	闭环系统特征值	开环系统特征值	闭环系统特征值
(总阻尼 - 41.491)	(总阻尼 - 41.491)	(总阻尼 - 41.497)	(总阻尼 - 41.497)
-0.1132 ± j0.9024i	-4.8212 ± j3.7943i	-0.1427 ± j0.4152i	-4.6977 ± j5.0869i
-0.1416 ± j0.5386i	-4.0297 ± j2.1441i	-0.1423 ± j0.5621i	-4.2104 ± j3.2035i
-0.1403 ± j0.4781i	-2.5163 ± j2.5768i	-0.1407 ± j0.2378i	-2.7141 ± j2.4448i
-0.2521	-2.6678 ± j1.3015i	-0.2782	-2.4280 ± j2.1614i
-0.2287	-0.8977 ± j4.0014i	-0.1857	-0.9073 ± j3.7144i
-0.1801	-2.6070 ± j0.5493i	-0.2021	-2.4620 ± j0.8811i
-0.0337	-2.6784 ± j0.2787i	0.0274	-2.7934 ± j0.2915i
-0.0065	-1.0533	-0.0068	-1.0710
-10.0000 (4个)		-10.0000 (4个)	

由于重载工况没有改变系统的阻尼特性,所以扰动后的转子摇摆也无明显变化,几乎和轻载工况相同。图8和图9是轻载和重载方式在相同故障下的暂态仿真,结果显示两种情况下的转子摇摆过程基本相当。

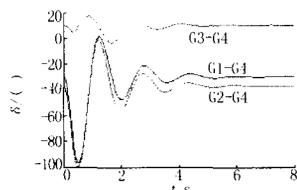


图 8 功角暂态响应(轻载)

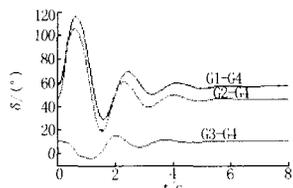
Fig 8 Angle  $\delta$  transient responses of generator(light load)

图 9 功角暂态响应(重载)

Fig 9 Angle  $\delta$  transient responses of generator(heavy load)

#### 4 阻尼竞争与阻尼协调

在电力系统总阻尼不变的情况下,一个模式阻尼的增加,必然导致另一个或几个模式阻尼的减少,反之亦然,本文称之为阻尼竞争。阻尼竞争的形式可以划分为两种,一种是机电模式与电磁模式的阻尼竞争;另一种是机电模式与机电模式的阻尼竞争。前者会造成功角稳定性和电压摇摆难以兼顾;后者会造成个别发电机机电阻尼不足而引起低频振荡。

在电力系统的总阻尼一定的情况下,为了保证每一个振荡模式,尤其是机电振荡模式具有合适的阻尼,必须进行恰当的阻尼分配,本文称之为阻尼协调。本文算例中用到单机系统和多机系统的线性最优励磁和最优分散协调励磁规律,就是两种阻尼协调方案,它使得闭环系统在总阻尼不变的情况下,却得到了合理的阻尼分配。当然,其他先进、有效的附加励磁控制、汽门控制、FACTS控制、HVDC功率调制以及广域控制等<sup>[10,11]</sup>,也必须服从阻尼协调的思想。

另外,在PSS控制过程中,和线性最优控制、分散协调控制类似,也存在多个PSS竞争阻尼的现象,文献[6]深刻揭示了PSS控制过程阻尼传递机理。可以肯定地说,阻尼竞争和阻尼协调普遍存在于复杂电力系统各种调控装置之间。今后的电力系统是多控制器电力系统,阻尼竞争愈显复杂,阻尼协调更加困难,必须高度重视。

阻尼竞争与阻尼协调概念既适用于线性系统,也适用于非线性系统。电力系统的光滑非线性表现为发电机功率特性是全局状态变量的非线性函数,而影响总阻尼大小的主要因素是 $T_e$ ,  $T_c$ 不出现在功率特性函数中,所以总阻尼并不受非线性因素的影响,即阻尼守

恒性在非线性电力系统中成立。当运行工况变化时,系统阻尼特性是有变化的,这种变化正是阻尼竞争作用的结果。线性系统的阻尼竞争只表现在控制器参数调整时而引起的各模式阻尼彼此消长;非线性系统的阻尼竞争除具有线性系统的特点外,还表现为,当各控制器参数固定时,运行工况变化也会引起阻尼竞争。线性系统的阻尼协调在设计控制器时离线完成,而非线性系统的阻尼协调在典型运行点离线完成以后,还可能因工况变化再次破坏阻尼协调的成果,可见,非线性电力系统的阻尼协调应有在线自适应功能,而不是一劳永逸的。

由于电力系统阻尼守恒,阻尼协调将有相当难度。因为阻尼协调必须使用全局模型。然而,实际系统的全局模型参数难以精确获得;基于全局模型的任何优化计算,必将耗时惊人。所以,当前仍然是基于局部模型或等值模型进行控制器设计。这样,即使进行参数优化,也不可能是有效的阻尼协调,在片面追求某一模式阻尼提高时,有可能导致新的弱阻尼模式出现。阻尼控制有可能遇到顾此失彼的尴尬局面。因此,阻尼守恒是造成阻尼控制困难的根本原因。

#### 5 结论

1)电力系统总阻尼是一项比较稳定的运行指标,在线性附加励磁控制下保持不变,其大小仅决定于系统结构参数。

2)装设快速励磁的系统总阻尼显著大于装设慢速励磁的系统总阻尼。快速励磁不仅有利于提高暂态稳定性,而且在附加励磁下将成为改善小干扰稳定性的主要手段。

3)电力系统在轻载和重载方式下具有相同的系统总阻尼,只要励磁控制恰当,重载时不会恶化系统阻尼,其动态指标完全可能和轻载时相当。重载和低频功率振荡没有必然联系。

4)阻尼竞争现象在电力系统中客观存在,在多控制器的复杂电力系统中,竞争行为更为复杂;阻尼协调是一切电力系统调控装置的基本目标之一,阻尼协调工作非常必要,协调任务非常艰巨,紧急协调途径和具体手段需加强研究。

#### 参考文献:

- [1] Demelb F P, Concordia C. Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(4): 316-329.

- [2] Rogers G. Power System Oscillation[M]. Kluwer Academic Publishers, 2000
- [3] Wang Y, Hin D J, Gao L, et al. Transient Stability Enhancement and Voltage Regulation of Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993, 8(2): 620-627.
- [4] 卢强,王仲鸿,韩英铎. 输电系统最优控制[M]. 北京: 科学出版社, 1982  
LU Qiang, WANG Zhong-hong, HAN Ying-duo. Optimal Control of Power Systems[M]. Beijing: Science Press, 1982
- [5] 韩英铎,王仲鸿,陈淮金. 电力系统最优分散协调控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997.  
HAN Ying-duo, WANG Zhong-hong, CHEN Huai-jin. Optimal Decentralized Coordinated Control of Power Systems[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [6] 赵书强,常鲜戎,贺仁睦,等. PSS控制过程中的借阻尼现象与负阻尼效应[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(5): 7-11.  
ZHAO Shu-qiang, CHANG Xian-rong, HE Ren-mu, et al. Borrow Damping Phenomena and Negative Damping Effect of PSS Control[J]. Proceedings of CSEE, 2004, 24(5): 7-11.
- [7] 余耀南. 动态电力系统[M]. 北京: 水利水电出版社, 1985  
YU Yao-nan. Dynamic Power Systems[M]. Beijing: Hydro Power Press, 1985
- [8] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994
- [9] 方思立. 台湾电力系统采用 PSS提高电力系统动态稳定[J]. 电网技术, 1996, 20(1): 38-39.  
FANG Si-li. Increase Dynamic Stability of Taiwan Power System by Application of PSS[J]. Power System Technology, 1996, 20(1): 38-39
- [10] Abido M A. Parameter Optimization of Multimachine Power System Stabilizers Using Genetic Local Search[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2001, 23(8): 785-794
- [11] CAI Li-jun, Erlich I. Simultaneous Coordinated Tuning of PSS and FACTS Damping Controllers in Large Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2005, 20(1): 294-300

收稿日期: 2005-04-27; 修回日期: 2005-08-24

作者简介:

郝正航(1972-),男,硕士,副教授,研究方向为动态电力系统分析与控制,FACTS, HVDC等; E-mail: haozhenghang@163.com

邱国跃(1959-),男,硕士生导师,研究方向为电力系统运行与控制、人工智能等;

陈卓(1980-),女,硕士,研究方向为复杂系统分析与控制。

### Analysis and research of damping character of power systems

HAO Zheng-hang, QU Guo-yue, CHEN Zhuo, XU Ke-ming

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

**Abstract:** According to the linear state equations of simple power systems and complex power systems, it is proved that both open-loop system and close-loop system have equal general damping when linear feedback excitations are installed, that is to say that all the power systems have character of damping conservation. By analyzing several factors of influencing general damping, the paper concludes that fast excitation will afford strong damping to power systems. Meanwhile, the results of eigenvalues calculation and dynamic simulation prove that fast excitation system have the decisive influence to the small signal stability. At the same time, a conclusion is drawn that the general damping have not changed when load is heavy or not, and heavy load don't deteriorate the systematic damping as long as excitation law is reasonable. Finally, it is suggested that the phenomenon of damping competition exist in the power system because of damping conservation, especially in complicated power systems with multi-controllers. Damping coordination is very necessary and difficult.

**Key words:** power system; damping character; fast excitation; dynamic stability; small-signal stability

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告