

# 运行条件变化对机电振荡模式的影响分析

胡金磊<sup>1</sup>, 王克文<sup>1</sup>, 谢志棠<sup>2</sup>, 钟志勇<sup>2</sup>

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 香港理工大学电机工程系, 中国 香港)

摘要: 采用特征值灵敏度分析的方法, 确定多机电力系统在 720 个运行条件下的机电振荡模式。在此基础上, 定量分析了振荡模式随运行条件的变化特性, 从而对基于概率灵敏度方法确定的机电振荡模式进行了验证。所述分析在一 8 机系统的算例上进行。

关键词: 特征值; 灵敏度; 机电振荡模式

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)22-0020-05

## 0 引言

作为电力系统小干扰稳定性分析的方法之一, 模式分析不仅提供了相对明确的物理解释, 同时为进一步的稳定器配置提供了依据。

在模式分析中, 振荡模式的确定最初仅依赖于右特征向量<sup>[1]</sup>, 而后就被更为合理的参与因子法所替代, 参与因子描述了模式中状态变量的相对参与程度。文献[3]根据系统的可观察矩阵提出了基于电磁功率的模式分析方法, 并以此进行电力系统稳定器(PSS)的选址。而配置 PSS 所广泛采用的特征值灵敏度法<sup>[4,5]</sup>, 实际上也可以用来进行机电振荡模式的分析。

传统的分析通常基于单一的系统运行方式, 当系统运行条件发生变化时, 各发电机对某一模式的参与程度将发生变化, 有必要定量考查这种变化的大小关系, 从而为进一步的稳定器配置和计及多运行条件的概率特征值灵敏度分析<sup>[6]</sup>提供依据。

本文根据特征值灵敏度表达, 以 720 个运行方式为样本, 确定每个运行方式下的机电振荡模式, 分析运行方式对振荡模式的影响。在此基础上, 对基于概率特征值灵敏度分析的结果进行比较和验证。

## 1 特征值灵敏度

特征值灵敏度可直接用于振荡模式的确定。由于在形成系统状态空间方程时具体表达上的差异, 灵敏度的表达形式也不尽一致。本文采用文献[7]中的插入式建模技术(PMT)来形成系统状态空间方程:

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50177028); 香港理工大学研究项目(G- T731)

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BR + ER \\ Y = CX + DR \end{cases} \quad (1)$$

系统的特征值从系数矩阵 A 计算确定。各系数矩阵的详细表达式及形成过程见文献[7]。

第 k 个特征值  $\lambda_k = \alpha_k \pm j \beta_k$  对参数 K 的一阶和二阶灵敏度可分别表达为<sup>[8]</sup>:

$$\frac{\partial \lambda_k}{\partial K_i} = W_k^T \frac{\partial A}{\partial K_i} U_k \quad (2)$$

$$\frac{\partial^2 \lambda_k}{\partial K_i \partial K_j} = W_k^T \frac{\partial^2 A}{\partial K_i \partial K_j} U_k + \frac{\partial W_k^T}{\partial K_i} \frac{\partial A}{\partial K_j} U_k + \frac{\partial W_k^T}{\partial K_j} \frac{\partial A}{\partial K_i} U_k \quad (3)$$

式中:  $W_k$  和  $U_k$  分别为第 k 个特征值  $\lambda_k$  的左、右特征向量, 且已标准化, 即  $W_k^T U_k = 1$ 。进一步的详细表达见文献[8], 由此可以方便而系统化地计算所有特征值对任意参数的灵敏度。

PSS 已广泛应用于改善系统的动态特性。当 PSS 仅用一零增益环节表达时, 并不会对原系统产生影响。本文在每台发电机都配有零增益 PSS 的基础上, 通过计算特征值对 PSS 增益的灵敏度来分析各发电机对机电振荡模式的参与程度。

当仅关心特征值实部  $\alpha_k$  时, 可按  $\partial \alpha_k / \partial K_i$  进行振荡模式分析, 即:

$$\partial \alpha_k / \partial K_i = \text{Re}(\partial \lambda_k / \partial K_i) \quad (4)$$

## 2 模式分析

### 2.1 以单运行方式为基础

在单一运行方式下, 用式(4)确定机电振荡模式。对每一运行样本, 形成系统矩阵 A, 计算相应的特征值, 以及所关心的特征值对所有 PSS 增益的灵敏度。对 720 个运行样本重复 720 次。

由于运行条件的变化, 计算结果中特征值的大小与次序也可能改变, 所以需要识别每一振荡模式

在不同样本中的数值和相应的灵敏度值,从而分析模式的变化情况。

## 2.2 以概率特征值灵敏度为基础

概率特征值分析可将多运行方式集中在一次数值计算过程中完成。正态假定下,若  $k$  的均值和标准差分别为  $\bar{k}$  和  $\sigma_k$ ,则  $k$  将以 0.999 93 的概率分布在区间  $(\bar{k} - 4\sigma_k, \bar{k} + 4\sigma_k)$  之内,并可近似认为完全分布在该区间内<sup>[9]</sup>。因此,为保证相应模式的稳定性,该区间应完全位于复平面的左半平面,也可用区间上界  $k$  描述为:

$$k = \bar{k} + 4\sigma_k \quad (5)$$

当采用 PSS 改善系统阻尼时,应使式(5)描述的上界在复平面上向左移动。因此,可利用  $k$  的灵敏度  $S_k$  进行多方式下的概率模式分析,即

$$S_k = \frac{\partial k}{\partial K_i} = \frac{\partial \bar{k}}{\partial K_i} + 4 \frac{\partial \sigma_k}{\partial K_i} \quad (6)$$

式(6)中包含了均值的灵敏度与标准差的灵敏度。均值灵敏度的计算与单方式下的式(4)类似,标准差的灵敏度需用到式(3)所示的二阶灵敏度表达,详见文献[6]。

式(6)的表达显然更适合于与 PSS 定位有关的模式分析。但为了与单方式下反复计算的结果相比较,可仅用式(6)右侧第一项,即均值的灵敏度  $\partial \bar{k} / \partial K_i$  进行模式确定计算。

## 3 算例分析

在图 1 所示的 8 机 24 节点系统中,发电机采用 6 阶模型,系统状态矩阵为 88 阶。各节点功率和 PV 节点电压的标准日运行曲线见文献[9],为了模拟系统的多运行方式,从这些运行曲线中生成 720 个运

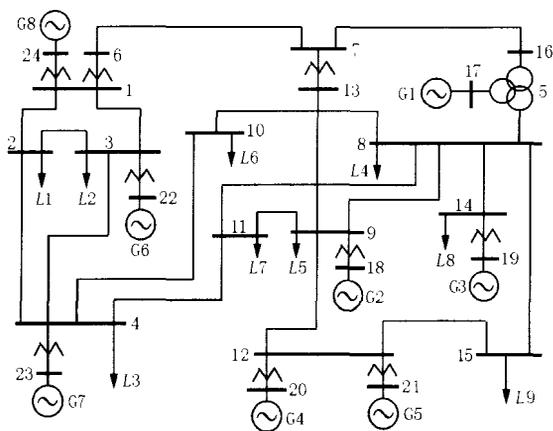


图 1 8 机系统

Fig. 1 Eight-machine system

行样本。8 台发电机均配有仅含零增益环节的 PSS,输入信号为电磁功率偏差  $P_e$ 。

此系统共有 88 个特征值(25 对复根和 38 个实根)。由于在  $n$  机系统中,共有  $n - 1$  个机电振荡模式,因此本例中有  $8 - 1 = 7$  个。

后续讨论中将用到阻尼比的概念,第  $k$  个模式的阻尼比为<sup>[9]</sup>:

$$\zeta_k = -\operatorname{Re}(k) / \sqrt{2\operatorname{Im}(k)^2 + \operatorname{Re}(k)^2} \quad (7)$$

为了保证系统的动态特性,阻尼比  $\zeta_k$  应不小于某一给定值  $\zeta_c$ 。本文中取  $\zeta_c = 0.1$ <sup>[9]</sup>。

### 3.1 基于确定性方法的分析

#### 3.1.1 机电振荡模式及灵敏度

分别计算 720 个运行方式的特征值,识别出对应的机电振荡模式。例如,第 360 个运行样本下对应于机电振荡的 7 对特征值如表 1。

表 1 第 360 个运行样本的机电模式

Tab. 1 Electromechanic modes of the 360th operating sample

模式	特征值	阻尼比	频率/Hz
1	-1.800 ±j15.589	0.114 7	2.481 0
2	-0.754 ±j11.124	0.067 6	1.770 5
3	-0.742 ±j7.691	0.096 1	1.224 1
4	-0.651 ±j7.795	0.083 2	1.240 7
5	-0.508 ±j9.419	0.053 9	1.499 1
6	-0.417 ±j6.473	0.064 1	1.030 2
7	-0.004 ±j3.823	0.001 1	0.608 4

在不同的运行样本中,对应于机电模式的特征值大小会有所变化,但相邻两个样本的结果不会有明显的差别。在 720 个运行样本中,第一个模式的阻尼比绝大部分大于 0.1(最小为 0.096 87),其余六个模式的阻尼比均小于 0.1,不能满足要求。特别是第七个振荡模式,特征值的实部和阻尼比均分布在零附近,振荡频率分布在区间(0.570 1 ~ 0.631 8)内,属于区域振荡模式。随运行方式的变化,第七个模式在第 488 次至第 530 次的特征值实部均大于零,系统已经处于不稳定状态。

考虑到每一运行样本中的每一个模式对 8 个 PSS 的灵敏度,720 个运行样本共产生  $7 \times 8 \times 720 = 40\ 320$  个灵敏度值。为说明起见,仅以  $\zeta_3$  对 PSS3 增益的灵敏度  $\partial \zeta_3 / \partial k_3$  为例,从第一个运行样本开始,每隔 10 个样本取值,共 72 个值按横排次序如下:

1.422 7 1.425 4 1.424 8 1.422 1 1.456 4 1.498 8 1.532 7  
1.548 2 1.559 1 1.566 3 1.562 1 1.542 9 1.496 2 1.451 8  
1.534 9 1.653 7 1.728 5 1.785 4 1.828 8 1.830 9 1.833 7

1.837 1	1.900 9	1.965 7	2.033 2	2.075 9	2.125 1	2.181 2
2.261 3	2.341 3	2.410 2	2.118 4	1.835 5	1.433 9	1.412 9
1.427 8	1.490 8	1.565 7	1.639 6	1.707 6	1.859 2	1.983 0
2.109 5	2.200 8	2.302 3	2.412 5	2.412 2	2.412 0	2.411 8
2.364 6	2.320 2	2.280 3	2.029 2	1.835 4	1.637 2	1.788 2
1.903 3	2.018 6	2.015 9	2.013 4	2.011 2	1.958 6	1.909 8
1.864 1	1.824 1	1.784 0	1.743 1	1.686 1	1.618 5	1.538 1
1.469 2	1.422 7					

可见,  $\partial z / \partial k_3$  在不同方式下的数值并不相同, 最大值为 2.421 5, 最小为 1.422 1, 表明发电机参与振荡的程度发生了变化。为方便处理, 本文着重分析每个振荡模式中各发电机参与振荡的强弱顺序。

3.1.2 参与度、模式主样本及一致率

在模式分析中, 主要关心发电机参与振荡的程度, 即“参与度”。对于第  $m$  个系统运行样本下的第  $n$  个振荡模式, 将其对 8 个 PSS 的灵敏度值进行标准化处理, 即:

$$P_{m,n,i} = |S_{m,n,i}| / |S_{m,n,max}| \quad (i=1, 2 \dots 8) \quad (8)$$

其中:  $S_{m,n,max}$  为 8 个灵敏度值中绝对值最大的一个。显然, 最大参与度为 1。为便于统计分析, 假设参与度大于 0.5 的发电机为强相关机组; 参与度介于 0.5 和 0.05 之间的发电机为一般相关机组; 小于 0.05 的划入弱相关机组。以第 360 个运行样本为例, 处理结果如表 2 所示, 括号中的数值为未取绝对值的参与度  $S_{m,n,i} / S_{m,n,max}$ , 第一个模式中的 G2 为弱相关发电机。

表 2 第 360 个运行样本的处理结果

Tab.2 Results of the 360th operating sample

模式	强相关机组	一般相关机组
1	G1 (1.00)	G2 (0.041 9)
2	G2 (1.00)	G6 (0.104 5)
3	G3 (1.00)	G5 (- 0.168 7), G7 (0.057 1)
4	G4 (1.00), G5 (0.618 3)	G3 (- 0.176 0)
5	G6 (1.00)	G7 (- 0.053 0)
6	G7 (1.00), G5 (0.789 3)	G4 (- 0.367 0)
7	G7 (1.00), G3 (0.673 3)	G8 (0.342 5), G5 (- 0.318 4), G4 (- 0.156 3), G6 (0.061 8)

由表 2 可见, 属于区域振荡的第七个模式涉及机组较多, 有四台发电机的参与度超过了 0.3, 最小的参与度也有 0.016 1; 而属于局部振荡的前六个模式一般只有 2~3 台发电机。

为进一步统计分析, 设某机电振荡模式  $M_k$  在 720 个系统运行样本中的模式样本依次为  $M_{k1}, M_{k2}, \dots, M_{k720}$ , 其中某些模式样本是相同的 (指发电机参

与振荡的强弱顺序相同), 把相同次数最多的样本称为  $M_k$  的模式主样本, 记为  $M_{k0}$ 。计算  $M_{k0}$  在 720 个样本中出现的概率, 记为一致率  $P_8$ ; 类似地,  $M_{k0}$  中参与度最大的前 7 台发电机组在 720 个样本中仍作为参与度最大的前 7 台出现的概率, 记为一致率  $P_7$  (很明显,  $P_7 = P_8$ ); 每次减少一台发电机, 得  $P_6, P_5, P_4, P_3, P_2$ ; 直到仅考虑  $M_{k0}$  中参与度最大的发电机时的  $P_1$ 。统计结果列于表 3。

为统计分析各发电机在 720 个样本中参与振荡的总体上的强弱, 计算模式主样本  $M_{k0}$  中各个发电机在不同运行样本下的参与度的平均值 (平均参与度), 对第  $n$  个模式中的第  $i$  台机组, 平均参与度为:

$$\bar{P}_{n,i} = \sum_{m=1}^k P_{m,n,i} \quad (9)$$

式中:  $k$  为模式主样本在 720 个系统运行样本中出现的次数。按平均参与度把  $M_{k0}$  中的发电机分为强、一般及弱相关机组。计算  $M_{k0}$  的强相关机组与所有相应模式样本中的强相关机组相同的概率, 记为  $P_s$ , 对一般机组也照此处理, 得到  $P_m$ 。结果如表 4。

表 3 一致率

Tab.3 Identical rates

主样本	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$P_4$	$P_5$	$P_6$	$P_7, P_8$
1	1	0.597	0.449	0.243	0.156	0.156	0.156
2	1	1	0.929	0.899	0.449	0.340	0.319
3	1	1	0.788	0.756	0.458	0.364	0.333
4	1	1	0.972	0.685	0.315	0.264	0.244
5	1	0.528	0.528	0.528	0.528	0.422	0.378
6	1	1	1	0.721	0.693	0.465	0.465
7	1	1	0.796	0.607	0.607	0.389	0.386

表 4 模式主样本构成

Tab.4 Constitute of main mode samples

主样本	强相关机组	$P_s$	一般相关机组	$P_m$
1	G1	1		1
2	G2	1	G6	0.796
3	G3	0.808	G5	0.513
4	G4, G5	1		0.698
5	G6	1	G2, G7	0.501
6	G7, G5	1	G4	0.799
7	G7, G3	1	G5, G8, G4, G6, G2	0.257

3.1.3 分析

由表 3 可知, 在不同的运行条件下, 机电振荡模式一般会发生不同程度的变化。在 720 个运行样本中, 模式主样本出现的概率 (即  $P_8$ ) 最大的也只有 0.4653。但随着发电机电台的减少, 一致率  $P_i$  逐步增

加,在  $i=2$  时,已经只有两个模式的一致率  $p_2$  没有达到 1。当仅考虑最强相关的一台发电机时,其一致率  $P_1$  已经全部为 1,表明模式中参与振荡最强的发电机在不同的运行方式下没有发生变化,有利于 PSS 的定位。

由于各台发电机参与振荡程度的不同,在配置 PSS 时,主要考虑每个模式中参与最强的发电机,并兼顾对振荡有一定影响的其它发电机组。在本文中,所要考虑的即为每个模式主样本中的强相关及一般相关机组。例如,根据表 3 和表 4,对模式 3,仅需要考虑 G3, G5 两台发电机,其一致率对应于  $P_2$ 。7 个模式中需要考虑的发电机数及相应的一致率列于表 5。

由表 5 可见,只有模式主样本 5 和 7 所对应的  $P_3$  和  $P_7$  没有达到 1。对属于区域振荡的模式 7,涉及了 7 台机组,其一致率  $P_7$  也较低,计算表明有五台发电机的平均参与度超过了 0.3。这对配置 PSS 的分析带来了难度,需要综合考虑。

表 5 需要考虑的发电机数及一致率

Tab. 5 The number of included generator and identical rates

模式	1	2	3	4	5	6	7
发电机数	1	2	2	2	3	3	7
一致率	$P_1$	$P_2$	$P_2$	$P_2$	$P_3$	$P_3$	$P_7$
	1	1	1	1	0.528	1	0.386

进一步观察表 4 中每个模式主样本中的强相关机组,它们在表 3 中对应的一致率分别为  $P_1$ 、 $P_1$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_2$ ,其值均为 1。表明每个模式主样本中的强相关发电机在不同运行样本下参与振荡的强弱顺序没有发生变化。这极大地方便了 PSS 的配置。

对于模式主样本 3, G3 一直保持为强相关;但 G5 在不同样本中虽然大部分为一般相关,有时却为强相关。因此,表 4 中模式主样本 3 的  $P_3$  小于表 3 中相应的  $P_1$ 。类似现象在一般相关机组中更为明显,不过这不会对配置 PSS 带来太大的影响。

由以上分析,在主要考虑平均参与度大于 0.5 的发电机的基础上,对应于第 2~7 个振荡模式的最佳 PSS 安装位置分别为 G2, G3, G4 (或 G5), G6, G7。

### 3.2 基于概率方法的分析

#### 3.2.1 按均值灵敏度确定机电振荡模式

为便于比较,按式 (6) 右侧第一项,即均值的灵敏度计算系统的七个机电振荡模式。类似于 3.1 节中的分析,把发电机分为强、一般及弱相关机组,结

果列于表 6。

由表 6 可见,除了第一个振荡模式外,其余振荡模式的阻尼比都小于 0.1,系统阻尼不足,需要加装 PSS。对第七个机电振荡模式,其特征值实部和阻尼接近于零,频率为 0.6084,属于区域振荡模式,这与单运行方式分析的结果相一致。

表 6 由概率分析得到的 7 个机电振荡模式

Tab. 6 Electromechanic oscillation modes obtained by the probabilistic approach

模式	阻尼比	频率 / Hz	强相关机组	一般相关机组
1	0.1085	2.5232	G1	
2	0.0678	1.7687	G2	G6
3	0.0860	1.1985	G3	G5
4	0.0803	1.2586	G4, G5	
5	0.0573	1.5661	G6	G2, G7
6	0.0647	1.0316	G7, G5	G4
7	0.0026	0.6084	G7, G3	G5, G3, G4, G6, G2

比较表 4 和表 6,由两种方法确定的强相关及一般相关机组完全一致。若以概率灵敏度确定的模式作为多运行方式的模式主样本,记为  $M_{k0}$ ,则它的一致率  $P_8$  如表 7。比较表 7 和表 3 中的  $P_8$ ,除在第四个模式稍有不同外,其它都完全相同,即两者的模式也相同。因此概率灵敏度确定的模式可以作为多运行方式下的模式主样本进行有关方面的分析。

表 7 概率分析下的一致率

Tab. 7 Identical rates obtained by the probabilistic approach

模式	1	2	3	4	5	6	7
一致率	0.156	0.333	0.319	0.135	0.378	0.465	0.386

#### 3.2.2 按区间上界 $k$ 的灵敏度 $S_k$ 进行 PSS 的选址

为能保证在所考虑运行条件下的整体最优,对于 PSS 选址所需的式 (6) 中左侧区间上界  $k$  的灵敏度  $S_k$ ,也可按照参与度将每个模式中发电机所对应的  $S_k$  分为强、一般及弱三种,如表 8。

表 8 按灵敏度  $S_k$  的分析结果

Tab. 8 Results via the analysis of sensitivity  $S_k$

模式	1	2	3	4	5	6	7
强	G1	G2	G3	G5, G4	G6	G7, G5	G7, G3
一般		G6				G4, G3	G8, G5
							G4

根据表 6 和表 8,由于方差灵敏度的影响,由均值灵敏度和区间上界灵敏度得到的结果有所不同,但相对应的强灵敏度中则只有第四个模式的不同。由表 8 知对应于第 2~7 个模式的最佳 PSS 安装位

置分别为 G2, G3, G5 (或 G4), G6, G7, 与单运行方式的分析相同。

根据以上的综合分析得到, 概率灵敏度可以用来进行多运行方式下的模式分析, 及进一步配置 PSS 等。

#### 4 结论

本文对 8 机 24 节点系统的 720 次运行方式的机电振荡模式进行了分析, 并与概率特征值灵敏度确定的模式作比较, 验证了后者的可行性。结果表明, 不同运行方式下的机电振荡模式会有一定程度的改变, 但振荡模式中参与度越大的发电机在不同运行方式下的变化越小, 每个振荡模式中的平均参与度较大的强相关机组都保持了不变, 并与概率灵敏度分析的结果一致。不过区域模式的一般相关机组变化很大, 需要综合考虑。

#### 参考文献:

- [1] de Mello F P, Nolan P J, Lasrowski T F, et al. Coordinated Application of Stabilizers in Multimachine Power Systems[J]. IEEE Trans on PAS, 1980, 99(3): 892-899.
- [2] Verghese G C, Perez-Arriaga I J, Schweppe F C. Selective Modal Analysis with Application to Electric Power Systems, Part I: Heuristic Introduction, Part II: The Dynamic Stability Problem[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(9): 3117-3134.
- [3] Tse C T, Tso S K. Approach to the Study of Small-perturbation Stability of Multimachine Systems[J]. IEE Proc - C, 1988, 135(5): 396-405.
- [4] Voumas C D, Papadias. Power System Stabilization via Parameters Optimization Application to the Hellenic Interconnected System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(3): 615-622.
- [5] Zhou E Z. Functional Sensitivity Concept and Its Application to Power System Damping Analysis[J]. IEEE Trans on PWRs, 1994, 9(1): 518-524.
- [6] Wang K W, Chung C Y, Tse C T, et al. Probabilistic Eigenvalue Sensitivity Indices for Robust PSS site Selection[J]. IEE Proc on Gener, Transm and Distrib, 2001, 148(6): 603-609.
- [7] 钟志勇, 谢志棠, 王克文 (ZHONG Zhi-yong, TSE Chi-tang, WANG Ke-wen). 适用于电力系统动态稳定分析的元件建模新方法 (A Novel Modeling Technique for Modern Power system Dynamic Studies) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2000, 20(3): 30-33.
- [8] Wang K W, Chung C Y, Tse C T, et al. Multimachine Eigenvalue Sensitivities of Power System Parameters [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(2): 741-747.
- [9] Wang K W, Tse C T, Tsang K M. Algorithm for Power System Dynamic Stability Studies Taking the Variation of Load Power[J]. Electric Power System Research Journal, 1998, 46: 221-227.

收稿日期: 2004-03-18; 修回日期: 2004-05-27

#### 作者简介:

胡金磊(1981-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究; E-mail: hujinlei@gs.zzu.edu.cn

王克文(1964-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统运行与控制方面的研究工作。

### Studies of the effect of operating condition variation on power system electromechanic oscillation modes

HU Jin-lei<sup>1</sup>, WANG Ke-wen<sup>1</sup>, TSE Chi-tang<sup>2</sup>, CHUANG Chi-yung<sup>2</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;

2. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong, China)

**Abstract:** With the eigenvalue sensitivity technique, the electromechanic oscillation modes under seven hundred and twenty operating conditions are determined in a multi-machine power system, based on which, the variation characteristics of oscillation modes with the variation of operating condition are studied. Therefore, results obtained from the probabilistic approach have been validated. All the studies are carried out on an eight-machine system.

**Key words:** eigenvalue; sensitivity; electromechanic oscillation mode