

# 电力系统区间振荡的阻尼与 区域间送电功率关系特性

王青, 马世英

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

## Relationship Between Inter-area Oscillation Damping in Power System and Inter-area Transmitted Power

WANG Qing, MA Shiying

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** It is an important content in the research on inter-area oscillation characteristic in power system to make the relationship between inter-area oscillation damping in power system and the inter-area transmitted power clear. Based on the engineering case of interconnection project of East China power grid, the theoretical analysis and research on the relationship between inter-area oscillation damping and inter-area transmitted power are proposed. The sensitivity of eigenvalue of electromechanical oscillation in two-machine interconnected system to relative angle between the rotors of the two generators is defined. Through the derivation of the sign of the sensitivity and its variation law, the general rule of the damping of electromechanical oscillation mode varying with the relative angle between the two rotors is obtained. On this basis, the relationship between inter-area oscillation damping and the inter-area transmitted power is turned into the relationship between the damping of electromechanical oscillation mode in interconnected power system with two equivalent machines and relative angle between the two rotors, and then the theoretical analysis and explanation of this problem are given.

**KEY WORDS:** inter-area oscillation; damping; small signal stability; transmitted power; power system

**摘要:** 区间振荡的阻尼与区域间送电功率关系特性是电力系统区间振荡特性研究的重要问题。结合华东互联系统工程实例, 对该问题着重进行了理论分析和探讨。定义了 2 机互联系统机电振荡模式的特征值对发电机转子相对角的灵敏度。通过对灵敏度符号变化规律的推导, 获得了机电振荡模式的阻尼随转子相对角大小变化的一般规律。在此基础上, 将区间振荡阻尼与区域间送电功率的关系特性问题, 转换为 2 等值机互联系统机电振荡模式的阻尼与转子相对角关系特性问题, 进而给出理论分析和解释。研究工作对于全面、准

确掌握区间振荡的复杂特性有一定的指导意义。

**关键词:** 区间振荡; 阻尼; 小干扰稳定; 送电功率; 电力系统

## 0 引言

在电网互联规模不断扩大、电网运行方式日益复杂, 新技术新设备的应用带来不确定因素增多情况下, 电力系统低频振荡发生的风险呈增大趋势。世界上许多国家和地区电网都观察到低频振荡现象<sup>[1-7]</sup>。根据涉及范围和参与机组分布特点, 低频振荡通常划分为局部振荡和区间振荡 2 种基本类型。与局部振荡相比, 区间振荡具有参与机组多、涉及范围广、危害性大、特性复杂、控制难度高等特点, 加强区间振荡的研究具有重要意义<sup>[1-15]</sup>。

区间振荡是系统中 2 群机组间的相对振荡, 群内机组大致同调, 群间机组大致反调。在电网结构上这 2 群机组一般分布在内部电气联系较强、彼此间联系较弱的 2 个区域电网中。区间振荡的阻尼与 2 区域电网间送电功率的关系特性是区间振荡研究的重要问题。文献[16-17]分别对一个 4 机 2 区对称算例系统和一个 8 机 2 区算例系统进行特征值计算, 观察到区间振荡的阻尼随区域间送电功率增大而降低。文献[18]对一个 5 机 2 区算例系统进行特征值计算, 观察到区间振荡的阻尼随区域间送电功率变化呈现一定的变化规律: 在大容量系统向小容量系统送电时, 送电功率越大区间振荡的阻尼越强, 在小容量系统向大容量系统送电时, 送电功率越大区间振荡的阻尼越弱。通过对不同算例系统的仿真计算, 以往已对区间振荡的阻尼与区域间送电功率的关系

特性获得了一定的认识,但由于缺乏更为深入的理论分析,无法解释不同算例系统呈现不同规律和特性的现象,对问题缺乏更为准确、清晰的认识。

本文将首先以华东互联系统为实例,采用小干扰稳定特征值计算和时域仿真相结合的方法,考察实际系统中区间振荡的阻尼与区域间送电功率的关系特性。随后对 2 机互联系统进行理论分析,推导揭示机电振荡模式的阻尼随 2 机转子相对角大小变化而变化的一般规律,并通过算例进一步验证理论分析的正确性。最后对实际系统中区间振荡的阻尼与区域间送电功率的复杂关系特性给出理论分析。

### 1 实际系统的仿真计算

2008 年华东互联系统包括安徽、江苏、浙江、福建和上海 5 个省市电网,通过葛南、龙政、宜华 3 路直流与华中电网异步联网。华东互联系统总装机约 153 GW,其中福建电网有 24 GW,华东主网有 129 GW。福建电网与华东主网通过长度约为 250 km 的 500 kV 宁德—双龙双回联络线(宁双线)相联。与系统装机规模相比,联络线容量很小,形成了较为明显的 2 区域弱联系的电网结构。小干扰稳定分析表明,该系统存在福建电网机组相对华东主网机组的区域振荡模式(记为研究模式 1)。以典型大负荷运行方式为研究方式,通过改变联络线 2 侧机组的出力,调整宁双线的送电功率,考察研究模式 1 的阻尼变化规律,计算结果如表 1 所示。可见,当福建电网向华东主网送电时,随着送电功率增大,研究模式 1 的阻尼降低;当福建电网从华东主网受电时,随着送电功率增大研究模式 1 的阻尼增强。在宁双线设置三相瞬时短路故障,可以观察到研究模式 1 被激发。图 1 给出了在宁双线 0MW、福建外送 1 500 MW 和福建受入 1 500 MW 时,福建电网中对研究模式 1 可观性较强的某机组的转速振荡曲线,可见不同送电方向下的衰减变化趋势与特

表 1 福建对华东主网区间振荡的阻尼特性

Tab. 1 Influence of transfer power from Fujian to East China main power grid on inter-area oscillation mode

福建送出功率/MW	特征值/(1/s)	阻尼比/%
0	-0.321 6+j2.573 7	12.4
500	-0.209 3+j2.656 6	7.85
1 000	-0.144 2+j2.562 8	5.62
1 500	-0.101 7+j2.492 3	4.08
-500	-0.390 7+j2.627 7	14.71
-1 000	-0.411 1+j2.625 0	15.47
-1 500	-0.462 9+j2.636 5	17.29

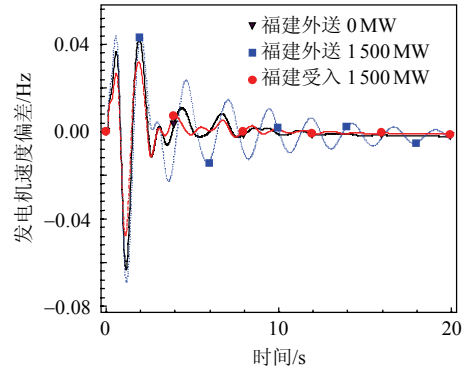


图 1 福建机组在小扰动下的转速曲线  
Fig. 1 Relative rotor speed curves of one generator in Fujian power grid

征值计算结果一致,验证了特征值分析的正确性。图 2 给出了在宁双线功率为 0 MW 时研究模式 1 的模式图。

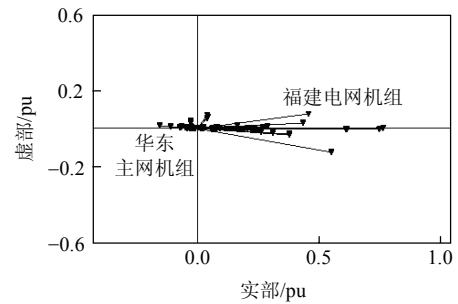


图 2 福建对华东主网区间振荡的模式  
Fig. 2 Right eigenvector of Fujian to East China main power grid inter-area oscillation mode

## 2 2 机互联系统的阻尼特性

### 2.1 特征值灵敏度的推导和分析

1) 小干扰稳定分析的数学模型。

为简化分析,机组采用 2 阶经典模型,负荷采用恒阻抗模型。2 机互联系统的状态方程<sup>[19]</sup>为

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

式中:  $\Delta \delta = [\Delta \delta_1 \ \Delta \delta_2]^T$  为发电机转子绝对角列向量;  $\Delta \omega = [\Delta \omega_1 \ \Delta \omega_2]^T$  为发电机转速列向量;  $\mathbf{M} = \text{diag}\{M_1, M_2\}$  为发电机的惯性时间常数对角阵;  $\mathbf{D} = \text{diag}\{D_1, D_2\}$  为发电机的阻尼系数对角阵;  $\mathbf{K} = \{\partial P_{ei} / \partial \delta_j\}_{2 \times 2}$  为在运行点处发电机的同步功率系数矩阵;  $\mathbf{I}$  为  $2 \times 2$  的单位阵;  $\mathbf{0}$  为  $2 \times 2$  的零阵。

2 台发电机内电势之间的节点导纳为

$$\begin{cases} Y_{G12} = G_{12} + jB_{12} = |Y_{G12}| \angle \varphi_{12} \\ \varphi_{12} = \arctan(B_{12} / G_{12}) \end{cases}$$

2 台发电机输出的有功功率为

$$P_{e1} = G_{11}E_1'^2 + E_1'E_2'|Y_{G12}|\sin(\delta_{12} + \frac{\pi}{2} - \varphi_{12}) \quad (2)$$

$$P_{e2} = G_{22}E_2'^2 + E_1'E_2'|Y_{G12}|\sin(\delta_{21} + \frac{\pi}{2} - \varphi_{12}) \quad (3)$$

在某个运行点，设 2 台发电机的转子相对角为  $\delta_{120}$ ，可计算发电机的同步功率系数为

$$K_{11} = -K_{12} = E_1'E_2'|Y_{G12}|\cos(\delta_{120} + \frac{\pi}{2} - \varphi_{12}) \quad (4)$$

$$K_{22} = -K_{21} = E_1'E_2'|Y_{G12}|\cos[\delta_{120} - (\frac{\pi}{2} - \varphi_{12})] \quad (5)$$

2) 特征方程和特征值。

系统矩阵  $A_s$  的特征方程为

$$|A_s - \lambda I| = 0 \quad (6)$$

利用矩阵变换和 Schur 定理<sup>[20]</sup>可得

$$\lambda^4 + (\frac{D_1 + D_2}{M_1 M_2})\lambda^3 + (\frac{K_{11}}{M_1} + \frac{K_{22}}{M_2} + \frac{D_1 \cdot D_2}{M_1 M_2})\lambda^2 + \frac{1}{M_1 M_2}(D_1 K_{22} + D_2 K_{11})\lambda = 0 \quad (7)$$

下面分析式(7)的非零特征值情况，即研究以下方程的解

$$a_0\lambda^3 + a_1\lambda^2 + a_2\lambda + a_3 = 0 \quad (8)$$

式中： $a_0 = 1$ ； $a_1 = \frac{D_1}{M_1} + \frac{D_2}{M_2}$ ； $a_2 = \frac{K_{11}}{M_1} + \frac{K_{22}}{M_2} +$

$$\frac{D_1 D_2}{M_1 M_2}$$
； $a_3 = \frac{1}{M_1 M_2}(D_1 K_{22} + D_2 K_{11})$ 。

由于正常运行条件下  $K_{11}$ 、 $K_{22}$ 、 $D_1$  和  $D_2$  均为正值，可验证式(8)符合 Routh 稳定判据，系统 3 个特征值的实部都为负数。因 2 机系统有 1 个机电振荡模式，即对应 1 对共轭复数特征值，故可推断式(8)的解为：1 对实部为负值的共轭复数和一个负数，记作： $\sigma + j\omega$ 、 $\sigma - j\omega$ 、 $\mu$ 。存在

$$[\lambda - (\sigma + j\omega)][\lambda - (\sigma - j\omega)](\lambda - \mu) = 0 \quad (9)$$

将式(9)展开有

$$\lambda^3 - (2\sigma + \mu)\lambda^2 + (\sigma^2 + \omega^2 + 2\sigma\mu)\lambda - (\sigma^2 + \omega^2)\mu = 0 \quad (10)$$

式(10)与式(8)同解，存在

$$\begin{cases} a_1 = -(2\sigma + \mu) \\ a_2 = \sigma^2 + \omega^2 + 2\sigma\mu \\ a_3 = -(\sigma^2 + \omega^2)\mu \end{cases}$$

进一步有

$$\begin{cases} \mu = -(2\sigma + a_1) \\ a_2 = -3\sigma^2 + \omega^2 - 2\sigma a_1 \\ a_3 = a_1\sigma^2 + a_1\omega^2 + 2\sigma^3 + 2\omega^2\sigma \\ \omega^2 = \frac{3}{4}\mu^2 + \frac{1}{2}a_1\mu + a_2 - \frac{1}{4}a_1^2 \end{cases}$$

3) 机电振荡模式的阻尼对转子相对角灵敏度的分析。

定义 2 机系统中机电振荡模式特征值  $\lambda_T = \sigma + j\omega$  及其实部—衰减系数  $\sigma$  对 2 机转子相对角  $\delta_{120}$  的灵敏度分别为

$$S = \frac{\partial \lambda_T}{\partial \delta_{120}} \quad (11)$$

$$S_R = \frac{\partial \sigma}{\partial \delta_{120}} \quad (12)$$

令式(8)对  $\delta_{120}$  求偏导有

$$3\lambda^2 \frac{\partial \lambda}{\partial \delta_{120}} + 2a_1\lambda \frac{\partial \lambda}{\partial \delta_{120}} + a_2 \frac{\partial \lambda}{\partial \delta_{120}} + \lambda \frac{\partial a_2}{\partial \delta_{120}} + \frac{\partial a_3}{\partial \delta_{120}} = 0 \quad (13)$$

定义变量：

$$d = \frac{\partial a_2}{\partial \delta_{120}} = \frac{1}{M_1} \frac{\partial K_{11}}{\partial \delta_{120}} + \frac{1}{M_2} \frac{\partial K_{22}}{\partial \delta_{120}} \quad (14)$$

$$e = \frac{\partial a_3}{\partial \delta_{120}} = \frac{D_1}{M_1 M_2} \frac{\partial K_{22}}{\partial \delta_{120}} + \frac{D_2}{M_1 M_2} \frac{\partial K_{11}}{\partial \delta_{120}} \quad (15)$$

$$A_1 = -\frac{\partial K_{11}}{\partial \delta_{120}} = E_1'E_2'|Y_{G12}|\sin(\delta_{120} + \frac{\pi}{2} - \varphi_{12}) \quad (16)$$

$$A_2 = -\frac{\partial K_{22}}{\partial \delta_{120}} = E_1'E_2'|Y_{G12}|\sin[\delta_{120} - (\frac{\pi}{2} - \varphi_{12})] \quad (17)$$

式(13)经整理可得

$$\frac{\partial \lambda}{\partial \delta_{120}} = -\frac{d\lambda + e}{3\lambda^2 + 2a_1\lambda + a_2} \quad (18)$$

将  $\lambda_T = \sigma + j\omega$  代入式(18)有

$$S = -\frac{d\sigma + e + j\omega}{3\sigma^2 - 3\omega^2 + 2a_1\sigma + a_2 + j(6\sigma\omega + 2a_1\omega)} \quad (19)$$

令： $d\sigma + e = R_1$ ， $d\omega = \Omega_1$ ， $3\sigma^2 - 3\omega^2 + 2a_1\sigma + a_2 = R_2$ ， $6\sigma\omega + 2a_1\omega = \Omega_2$ ，式(19)可写为

$$S = -\frac{R_1 + j\Omega_1}{R_2 + j\Omega_2} \quad (20)$$

有

$$S_R = -\frac{R_1 R_2 + \Omega_1 \Omega_2}{R_2^2 + \Omega_2^2} \quad (21)$$

式(21)表明  $S_R$  的正负符号取决于  $R_1 R_2 + \Omega_1 \Omega_2$  的符号，利用在特征方程(2)和特征值部分最后推得的关系式，经化简可得

$$R_1 R_2 + \Omega_1 \Omega_2 = 2\omega^2 \left[ \frac{A_1}{M_1} (\mu + \frac{D_2}{M_2}) + \frac{A_2}{M_2} (\mu + \frac{D_1}{M_1}) \right] \quad (22)$$

下面分 2 种情况讨论  $R_1 R_2 + \Omega_1 \Omega_2$  的符号。

当 2 台发电机满足均匀阻尼条件，机组的单位惯性时间常数阻尼系数为： $K_d = D_1/M_1 = D_2/M_2$ ，代入系统特征方程式(7)，经整理可得

$$\lambda(\lambda + K_d)[\lambda^2 + K_d\lambda + (\frac{K_{11}}{M_1} + \frac{K_{22}}{M_2})] = 0 \quad (23)$$

因此非零特征值为

$$\mu = -K_d \tag{24}$$

$$\begin{cases} \sigma = -\frac{K_d}{2} \\ \omega = \frac{1}{2} \sqrt{4\left(\frac{K_{11}}{M_1} + \frac{K_{22}}{M_2}\right) - K_d^2} \end{cases} \tag{25}$$

将式(24)代入式(22)有： $R_1R_2 + \Omega_1\Omega_2 = 0$ ，因此  $S_R = 0$ ，事实上从式(25)中  $\sigma$  是与转子相对角无关的常数也可得到相同的结果。

当 2 台发电机不满足均匀阻尼的条件时，为便于分析，定义变量： $T_1 = \frac{D_1}{M_1}$ ， $T_2 = \frac{D_2}{M_2}$ ， $N_1 = \frac{K_{11}}{M_1}$ ，

$$N_2 = \frac{K_{22}}{M_2}, B_1 = \frac{A_1}{M_1}, B_2 = \frac{A_2}{M_2}, f_s = \frac{A_1}{M_1} \left( \mu + \frac{D_2}{M_2} \right) + \frac{A_2}{M_2} \left( \mu + \frac{D_1}{M_1} \right).$$

式(21)可写为

$$S_R = -\frac{2\omega^2 f_s}{R_2^2 + \Omega_2^2} \tag{26}$$

将负实数特征值  $\mu$  代入式(8)有

$$a_0\mu^3 + a_1\mu^2 + a_2\mu + a_3 = 0 \tag{27}$$

式(27)对  $T_2$  求偏导，经整理可得

$$\frac{\partial \mu}{\partial T_2} = -\frac{\mu^2 + T_1\mu + N_1}{3\mu^2 + 2a_1\mu + a_2} \tag{28}$$

$f_s$  对  $T_2$  求偏导，经整理可得

$$\frac{\partial f_s}{\partial T_2} = (B_1 + B_2) \frac{\partial \mu}{\partial T_2} + B_1 \tag{29}$$

将式(28)代入式(29)有

$$\frac{\partial f_s}{\partial T_2} = \frac{r_1}{r_2} \tag{30}$$

$$\begin{cases} r_1 = (2B_1 - B_2)\mu^2 + (B_1T_1 + 2B_1T_2 - B_2T_1)\mu + N_2B_1 + T_1T_2B_1 - B_2N_1 \\ r_2 = 3\mu^2 + 2a_1\mu + a_2 \end{cases}$$

下面分析式(30)在  $T_2 = T_1$  处的符号。 $T_2 = T_1$  对应 2 台发电机有均匀阻尼，此时  $r_1$  可化简为

$$r_1 = \frac{(E_1E_2|Y_{G12}|)^2}{M_1M_2} \sin(\pi - 2\varphi_{12}) > 0$$

同时不难证明  $r_2 > 0$ ，这样有

$$\left. \frac{\partial f_s}{\partial T_2} \right|_{T_2=T_1} > 0 \tag{31}$$

根据  $T_2 = T_1$  时， $f_s = 0$ ，以及式(31)可推知：当  $T_2 > T_1$  时， $f_s > 0$ ；当  $T_2 < T_1$  时， $f_s < 0$ 。进一步根据式(26)和  $T_1$ 、 $T_2$  表达式有： $D_1/M_1 < D_2/M_2$  时， $S_R < 0$ ，即机电振荡模式特征值的实部随转子相对角  $\delta_{120}$  的增大在复平面内向负无穷小方向移动，对应着阻尼增强； $D_1/M_1 > D_2/M_2$  时， $S_R > 0$ ，即机电振荡模式特征值的

实部随转子相对角  $\delta_{120}$  的增大在复平面内向虚轴方向移动，对应着阻尼减弱。前面关于均匀阻尼的讨论已知：当  $D_1/M_1 = D_2/M_2$  时， $S_R = 0$ ，即机电振荡模式特征值的实部不随转子相对角  $\delta_{120}$  变化而变化。至此获得了 2 机互联系统机电振荡模式的阻尼(衰减系数)随 2 机转子相对角大小变化而变化的一般规律，即  $D_1/M_1$  与  $D_2/M_2$  之间的大小关系决定着阻尼是否变化以及如何变化。下面通过 2 个算例进一步验证上述数学推导和分析的正确性。

### 2.2 算例分析

1) 灵敏度符号变化规律验证。

本算例的 2 机互联系统结构如图 3 所示。

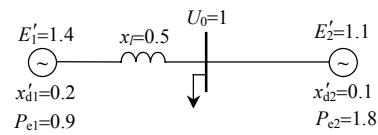


图 3 2 机互联电力系统结构

Fig. 3 Two-generator interconnected power system

经潮流计算，在运行点处 2 台发电机的转子角分别为： $\delta_{10} = 26.74^\circ$ ， $\delta_{20} = 9.42^\circ$ 。转子相对角为： $\delta_{120} = 17.32^\circ$ 。负荷吸收的功率为： $P_{ld} = 2.7$ ， $Q_{ld} = 1.21$ 。

通过网络星-角变换，计算收缩至发电机内节点的节点导纳矩阵元素为： $Y_{11} = y_{10} + y_{12} = 0.033 - j1.275$ ， $Y_{12} = -y_{12} = 0.231 - j1.082 = 1.106 \angle 77.94^\circ$ ， $Y_{22} = y_{20} + y_{12} = 1.616 - j2.434$ 。经计算可得： $P_{e1} = 0.065 + 1.703 \sin(\delta_{12} + 12.06^\circ)$ ， $P_{e2} = 1.955 + 1.703 \sin(\delta_{21} + 12.06^\circ)$ ， $K_{11} = 1.484$ ， $K_{22} = 1.696$ 。

将  $M_1$ 、 $M_2$ 、 $D_1$ 、 $M_2$  的取值分 4 种情况计算灵敏度  $S_R$  的变化。1)  $M_1 = 8$  s， $M_2 = 33$  s， $D_2 = 16.5$ ， $D_1$  变化；2)  $M_1 = 8$  s， $M_2 = 33$  s， $D_1 = 4$ ， $D_2$  变化；3)  $M_1 = 8$  s， $M_2 = 33$  s， $D_2 = 4$ ， $D_1$  变化；4)  $M_1 = 33$  s， $M_2 = 8$  s， $D_1 = 16.5$ ， $D_2$  变化。计算结果如图 4 所示，可见  $S_R$  符号变化规律与前面理论分析结论是一致的。

2) 机电振荡模式的阻尼与工况关系特性验证。

本算例 2 机互联系统的数据是在文献[10]中 4 机 2 区系统数据的基础上，删除联络线两侧的 2 台发电机及对应支路改造而成。发电机采用 2 阶经典模型，负荷采用恒阻抗模型。通过增减送受端发电机的出力，逐渐增大 2 台发电机的转子相对角，考察在  $D_1/M_1$  与  $D_2/M_2$  不同大小关系的 3 种情况下机电振荡模式阻尼的变化规律。计算结果如表 2—4 所示，可见阻尼变化规律与前面理论分析结论是一致的。

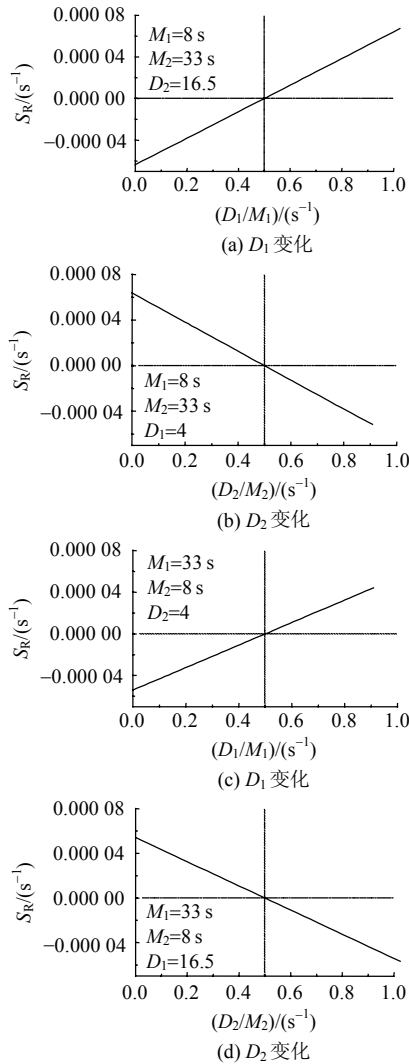


图 4  $S_R$  符号变化规律验证

Fig. 4 Sign verification of eigenvalue sensitivity  $S_R$

表 2  $D_1/M_1=D_2/M_2=0.5$  时阻尼变化情况

Tab. 2 Damping characteristics when  $D_1/M_1=D_2/M_2=0.5$

转子相对角/(°)	联络线功率/MW	特征值/(1/s)
3.87	100	-0.25+j5.605 0
13.73	200	-0.25+j5.541 9
23.82	300	-0.25+j5.398 3
34.42	400	-0.25+j5.155 9

表 3  $D_1/M_1=0.5, D_1/M_1=1$  时阻尼变化情况

Tab. 3 Damping characteristics when  $D_1/M_1=0.5, D_1/M_1=1$

转子相对角/(°)	联络线功率/MW	特征值/(1/s)
3.87	100	-0.379 1+j5.592 2
13.73	200	-0.383 3+j 5.528 7
23.82	300	-0.388 2+j 5.384 4
34.42	400	-0.394 6+j 5.140 9

表 4  $D_1/M_1=1, D_2/M_2=0.5$  时阻尼变化情况

Tab. 4 Damping characteristics when  $D_1/M_1=1, D_2/M_2=0.5$

转子相对角/(°)	联络线功率/MW	特征值/(1/s)
3.87	100	-0.369 5+j5.592 9
13.73	200	-0.365 2+j 5.529 9
23.82	300	-0.360 2+j 5.386 3
34.42	400	-0.353 7+j 5.143 9

### 3 实际系统阻尼特性的理论分析

前面研究获得了 2 机互联系统机电振荡模式的阻尼(衰减系数)随 2 机转子相对角大小变化而变化的一般规律。对于华东互联系统这样的工程实际系统中的区间振荡，由于参与振荡的 2 群机组具有群内机组大致同调，群间机组大致反调的特点，区间振荡可以用 2 等值机互联系统中的机电振荡等效理解，实际系统中区域间送电功率又与 2 等值机互联系统中 2 机转子相对角大小有一致的对应关系，这样区间振荡与区域间送电功率的关系特性问题可转换为 2 等值机互联系统机电振荡模式的阻尼与 2 机转子相对角关系特性问题理解。如果在 2 等值机互联系统中，存在  $D_1/M_1=D_2/M_2$  的关系，对应有机电振荡模式特征值的实部不随转子相对角  $\delta_{120}$  变化而变化，那么在实际互联系统中，区间振荡的阻尼(特征值的实部)将对区域间送电功率的变化不敏感；如果在 2 等值机互联系统中，存在  $D_1/M_1 < D_2/M_2$  的关系，对应有机电振荡模式特征值的实部随转子相对角  $\delta_{120}$  的增大在复平面内向负无穷小方向移动，即阻尼增强，那么在实际互联系统中，区间振荡的阻尼将随区域间送电功率的增大而增强；如果在 2 等值机互联系统中，存在  $D_1/M_1 > D_2/M_2$  的关系，对应有机电振荡模式特征值的实部随转子相对角  $\delta_{120}$  的增大在复平面内向虚轴方向移动，即阻尼减弱，那么在实际互联系统中，区间振荡的阻尼将随区域间送电功率的增大而减弱。

在华东互联系统中，观察到送电方向为福建电网向华东主网送电时，福建对华东主网区域模式的阻尼随送电功率增大而减弱；当送电方向改为华东主网向福建电网送电时，福建对华东主网区域模式的阻尼随送电功率增大而增强。上述现象可借助 2 等值机互联系统机电振荡模式的阻尼与 2 机转子相对角的关系特性来做一定的理论解释，2 等值机单位惯量阻尼系数的大小关系决定了区间振荡阻尼的变化规律。对于福建对华东主网的区域振荡模式，相对振荡的机组为福建机群和华东主网机群，可假设福建一侧的等值机为 1 号机，华东主网一侧的等值机为 2 号机，在 2 等值机互联系统中，可推测存在  $D_1/M_1 > D_2/M_2$  的关系，使得在福建电网外送功率时，区间振荡的阻尼随送电功率增大而减弱；当送电方向改为福建受入功率时，因送受端位置置换，区间振荡的阻尼变化情况也随之改变为送电功率越大阻尼越强。

## 4 结论

1) 本文以华东互联系统为工程实例, 考察了实际系统区间振荡的阻尼与区域电网间送电功率的关系特性。

2) 借助灵敏度概念, 推导分析了2机互联系统中转子相对角变化对机电振荡模式阻尼的影响规律。

3) 将区间振荡阻尼与区域间送电功率的关系特性问题, 转换为2等值机互联系统机电振荡模式的阻尼与转子相对角关系特性问题, 揭示了2等值机单位惯量阻尼系数的大小关系决定了区间振荡阻尼的变化规律。

## 参考文献

- [1] CIGRE Task Force 38.01.07 on Power System Oscillations. Analysis and control of power system oscillations[R]. Paris: CIGRE, 1996.
- [2] IEEE PES working group on system oscillations. Inter-area oscillations in power systems[R]. New York: IEEE Power Engineering Society, 1995.
- [3] Rogers G. Power system oscillations[M]. New York: Kluwer Academic Publishers, 2000: 1-7.
- [4] 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(in Chinese).
- [5] 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 Dongxia, 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 (in Chinese).
- [6] 董明齐, 杨东俊, 黄涌, 等. 华中电网 WAMS 实测区域低频振荡仿真[J]. 电网技术, 2009, 33(13): 64-69.  
Dong Mingqi, Yang Dongjun, Huang Yong, et al. Simulation of regional low frequency oscillation based on data measured by WAMS of Central China power grid[J]. Power System Technology, 2009, 33(13): 64-69(in Chinese).
- [7] 李丹, 苏为民, 张晶, 等. “9.1” 内蒙古西部电网振荡的仿真研究[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 41-47.  
Li Dan, Su Weimin, Zhang Jing, et al. Simulation study on west Inner Mongolia power grid oscillations occurred on September 1st, 2005[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 41-47 (in Chinese).
- [8] Barbier C, Ferrari E, Johansson K E. Questionnaire on electromechanical oscillation damping in power systems report on the answers[J]. Electra, 1979(64): 59-82, 84-90.
- [9] IEEE/CIGRE Joint Task Force on Stability Terms and Definition. Definition and classification of power system stability[J]. IEEE Transactions on Power System, 2004, 19(2): 1387-1401.

- [10] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill Inc, 1994: 548-550.
- [11] Liu Guoping, Xu Zheng, Huang Ying, et al. Analysis of inter-area oscillations in the south China interconnected power system[J]. Electric Power Systems Research, 2004(70): 38-45.
- [12] 毛晓明, 张尧, 管霖, 等. 南方交直流混合电网区域振荡的协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(20): 55-59.  
Mao Xiaoming, Zhang Yao, Guan Lin, et al. Research on coordinated control strategy for inter-area oscillations in China Southern AC/DC Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 55-59(in Chinese).
- [13] 王青, 闵勇, 张毅威. 超低频区间振荡现象的机理分析[J]. 继电器, 2006, 34(12): 63-68.  
Wang Qing, Min Yong, Zhang Yiwei. Mechanism analysis of ultra low frequency inter-area oscillation[J]. Relay, 2006, 34(12): 63-68(in Chinese).
- [14] 邓集祥, 贺建明, 姚天亮, 等. 大区域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 Jixiang, He Jianming, Yao Tianliang, 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(in Chinese).
- [15] 王青, 孙华东, 马世英, 等. 电力系统小干扰稳定安全评估的一般原则及其在贵州电网中的应用[J]. 电网技术, 2009, 33(6): 24-28.  
Wang Qing, Sun Huadong, Ma Shiyong, et al. General principle of power system small signal stability evaluation and its application in Guizhou power grid [J]. Power System Technology, 2009, 33(6): 24-28(in Chinese).
- [16] Klein M, Rogers G J, Kundur P. A fundamental study of inter-area oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 914-921.
- [17] So P L, Macdonald D C. Analysis and control of inter-area oscillations for security enhancement[C]/IEE Fourth International Conference on Power System Control and Management, UK, London: IEE, 1996: 65-70.
- [18] 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 Yankang, Glavitsch H. Eigenvalue classification and inter-area oscillation control in power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(6): 11-18(in Chinese).
- [19] 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: 252.
- [20] 现代数学手册编纂委员会. 现代数学手册 2 经典数学卷[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2000: 177.



王青

收稿日期: 2010-11-30.

作者简介:

王青(1974), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析和控制, E-mail: wangqing@epri.sgcc.com.cn;

马世英(1969), 男, 高级工程师, 研究方向为电力系统安全稳定分析和控制, E-mail: mashiy@epri.sgcc.com.cn.

(责任编辑 王晔)