第 25 卷第 7 期
2005 年 7 月

电力自动化设备
Electric Power Automation Equipment
Vol.25 No.7
Jul.2005

电力系统低频振荡和次同步振荡统一模型阻尼分析

胡云花[1],赵书强[2],马燕峰[2],黄常抒[3]
(1. 珠海电力设计院,广东 珠海 519000;2. 华北电力大学 电气工程学院,河北 保定 071003;
3. 广东国华粤电台山发电有限公司,广东 台山 529228)

摘要: 电力系统低频振荡和次同步振荡可能存在阻尼耦合,电力系统稳定器 PSS(Power System Stabilizer)等控制装置的加入在抑制低频振荡的基础上,会引发系统次同步振荡。从系统阻尼出发,运用小干扰分析法,对低频振荡和次同步振荡实施统一建模,并分析系统的阻尼变化规律。对算例运用特征根分析法,分析比较了PSS、励磁放大倍数以及发电机出力和功率因数等参数变化对系统各振荡模式阻尼的影响。结果表明系统阻尼守恒,且低频振荡与次同步振荡不可共容;在调节以上参数时须考虑对低频振荡和次同步振荡的双重影响。

关键词: 电力系统; 低频振荡; 次同步振荡; 阻尼; 特征根

中图分类号: TM 712　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 1006－6047(2005)07－0006－06

0 引言

研究表明,电力系统低频振荡和次同步振荡可能存在阻尼耦合[1~3],串联补偿电容、电力系统稳定器 PSS(Power System Stabilizer)等的加入在抑制低频振荡的同时,却可能导致或加剧次同步振荡。虽然实际中出现了许多问题,但两种振荡之间的耦合原理至今尚未给出。文献[3]虽然给出了耦合的结论,但只是对轴系分解的简单统一模型进行分析,没有考虑发电机绕组以及原动机和调速器的情况。本文在综合考虑低频振荡和次同步振荡的基础上对系统进行建模,建立系统的标准状态方程,运用特征根分析法,得到了一些有益的结论。

1 系统统一建模

1.1 模型简介

本文的研究对象是一带串联补偿电容的单机无穷大系统。在低频振荡分析中,因为振荡频率较低,可以考虑在不影响低频振荡模式的情况下将发电机的定子绕组用代数方程描述,同时因感应电流很小,可以忽略阻尼绕组的影响。而在次同步振荡分析中,因为系统中含有次同步分量电流,仅比系统工频略低,d,q 绕组的振荡模式不能忽略,必须用微分方程描述,同时因感应电流增大,阻尼绕组的影响也不可忽略,为此发电机采用派克方程。对于网络等值集中参数电感和电容元件,因为在次同步频率上呈现的感抗和容抗随频率而变,与工频下的值相差较大,故不应采用准稳态模型,而应采用电磁暂态模型[2]。对发电机轴系,在低频振荡的分析中可看作一刚体,但在分析次同步振荡时,必须将其分解成弹性质量块的形式,本文中将其分解为高压缸(HP)、中压缸(IP)、低压缸(LPA,LPB)、发电机(GEN)和励磁机(EX)的六质量块弹性模型,如图 1 所示。

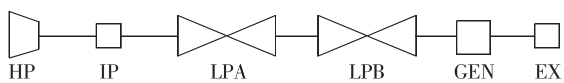

图 1 线性六质量块的弹簧系统

Fig.1 Linear spring system with six masses

1.2 小干扰法建立系统统一模型

运用小干扰分析法,建立系统的状态方程为

$$\begin{bmatrix} \dot{\boldsymbol{X}}_1 \\ \boldsymbol{C}_1\dot{\boldsymbol{X}}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \boldsymbol{A} & \boldsymbol{B} \\ \boldsymbol{C}_2 & \boldsymbol{D} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \boldsymbol{X}_1 \\ \boldsymbol{X}_2 \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中　$\boldsymbol{X}_1$ 为机械部分的状态变量;$\boldsymbol{X}_2$ 为电气部分的状态变量。

轴系模型的推导参见文献[1,2,4],本文中就不再赘述。

汽轮机的传递函数框图如图 2 所示,其中 ΔT_1,ΔT_2,ΔT_3 和 ΔT_4 分别为高压缸、中压缸、低压缸 A 和低压缸 B 的输出转矩增量。

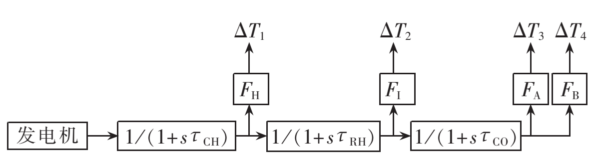

图 2 汽轮机传递函数框图

Fig.2 Transfer function block diagram of turbine

4 个汽轮转矩构成总的输出转矩:

$$\Delta T_1+\Delta T_2+\Delta T_3+\Delta T_4=\Delta T_m \tag{2}$$

收稿日期:2004－11－29;修回日期:2005－04－18

所有的汽轮转矩都成比例，每个汽缸承担一部分，其总和为

$$F_H+F_I+F_A+F_B=1 \tag{3}$$

由气流引起的 3 个时间常数为：在高压缸前面汽室中的τ_{CH}，在高、中压汽缸之间再热器中的τ_{RH}，以及在中、低压汽缸之间跨接管中的τ_{CO}。

调速器的传递函数如图 3 所示，其中 a 表示速度继电器的位置，g 表示调速器的开度。

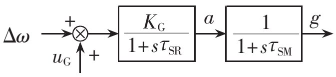

图 3　2 个时间常数的调速器

Fig.3 The speed controller with two time constants

发电机派克方程推导参见文献[1,2]。

$\boldsymbol{X}_2$ 中 Δu_{cd},Δu_{cq} 为系统串补电容的电压增量。值得注意的是，在线路上串补电容列写的是三相电压电流方程，为了和发电机的方程保持一致，必须将其进行派克变换，转化成 $d-q$ 坐标下的系统方程。小干扰分析后得电容部分的状态方程为

$$\begin{bmatrix}\Delta i_d\\ \Delta i_q\end{bmatrix}=\frac{1}{\omega_b X_c}\begin{bmatrix}\Delta \dot{u}_{cd}\\ \Delta \dot{u}_{cq}\end{bmatrix}+\frac{1}{X_c}\begin{bmatrix}0 & -1\\ 1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta u_{cd}\\ \Delta u_{cq}\end{bmatrix} \tag{4}$$

$$\begin{bmatrix}\Delta u_d\\ \Delta u_q\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R & -X\\ X & R\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\Delta i_d\\ \Delta i_q\end{bmatrix}+\frac{X}{\omega_b}\begin{bmatrix}\Delta \dot{i}_d\\ \Delta \dot{i}_q\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Delta u_{cd}\\ \Delta u_{cq}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}\Delta u_{od}\\ \Delta u_{oq}\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中　u_{cd},u_{cq} 代表串补电容上电压的 $d-q$ 轴分量；u_d,u_q 代表发电机端电压的 $d-q$ 轴分量；u_{od},u_{oq} 代表无穷大母线上的 $d-q$ 轴电压分量。

励磁系统的传递函数如图 4 所示，其中 $E_{fd}=X_{ad}u_f/r_f$，$\Delta u_t=U_{ref}-U_t$，τ_A 和τ_E 分别为电压调节器和励磁机的时间常数，ΔU_R 为电压偏差经过电压调节器放大后的输出电压。

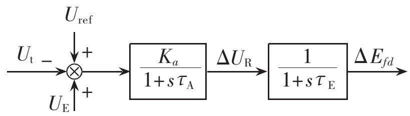

图 4　励磁系统传递函数

Fig.4 Transfer function of excitation system

2　系统阻尼特性分析

2.1　系统标准状态方程

为分析系统的总阻尼，必须将状态方程转化成标准形式，即

$$\begin{bmatrix}\dot{\boldsymbol{X}}_1\\ \dot{\boldsymbol{X}}_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A} & \boldsymbol{B}\\ \boldsymbol{C}_1^{-1}\boldsymbol{C}_2 & \boldsymbol{C}_1^{-1}\boldsymbol{D}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\boldsymbol{X}_1\\ \boldsymbol{X}_2\end{bmatrix} \tag{6}$$

由矩阵论知识可知，对于实数矩阵，如果存在复数特征根，则必然共轭成对出现，故矩阵的特征根之和等于特征根的实部之和，也等于系统对角元素之和，即系统的阻尼之和等于矩阵的迹[5]。由此系统的总阻尼只和对角线上的矩阵 $\boldsymbol{A}$ 和 $\boldsymbol{C}_1^{-1}\boldsymbol{D}$ 的对角元素有关，分析时只考虑这 2 项即可。

为分析方便将 $\boldsymbol{A}$ 分拆成 4 个矩阵的形式：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}\boldsymbol{A}_1 & \boldsymbol{A}_2\\ \boldsymbol{A}_3 & \boldsymbol{A}_4\end{bmatrix}$$

而和系统阻尼有关的只是 $\boldsymbol{A}_1$ 和 $\boldsymbol{A}_4$，在分析矩阵 $\boldsymbol{A}$ 时只考虑这 2 个分块矩阵即可。$\boldsymbol{A}_1$,$\boldsymbol{A}_4$,$\boldsymbol{C}_1$,$\boldsymbol{D}$ 的分块矩阵为

$$\boldsymbol{A}_4=\begin{bmatrix}\frac{-1}{\tau_{CH}} & 0 & 0 & 0 & \frac{F_H}{\tau_{CH}}\\ \frac{F_I}{F_H\tau_{RH}} & \frac{-1}{\tau_{RH}} & 0 & 0 & 0\\ 0 & \frac{F_A}{F_I\tau_{CO}} & \frac{-1}{\tau_{CO}} & 0 & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_{SR}} & 0\\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_{SM}} & \frac{-1}{\tau_{SM}}\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}
\frac{-D_1}{M_1} & \frac{-K_{12}}{M_1} & 0 & \frac{K_{12}}{M_1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
\omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & \frac{K_{12}}{M_2} & \frac{-D_2}{M_2} & \frac{-(K_{12}+K_{23})}{M_2} & 0 & \frac{K_{23}}{M_2} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & \frac{K_{23}}{M_3} & \frac{-D_3}{M_3} & \frac{-(K_{23}+K_{34})}{M_3} & 0 & \frac{K_{34}}{M_3} & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{34}}{M_4} & \frac{-D_4}{M_4} & \frac{-(K_{34}+K_{45})}{M_4} & 0 & \frac{K_{45}}{M_4} & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{45}}{M_5} & \frac{-D_5}{M_5} & \frac{-(K_{45}+K_{56})}{M_5} & 0 & \frac{K_{56}}{M_5}\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_b & 0 & 0 & 0\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{K_{56}}{M_6} & \frac{-D_6}{M_6} & \frac{-K_{56}}{M_6}\\
0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_b & 0
\end{bmatrix}$$

$$C_1=\begin{bmatrix} -(X_d+X)/\omega_b & 0 & X_{ad}/\omega_b & X_{ad}/\omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -(X_q+X)/\omega_b & 0 & 0 & X_{aq}/\omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -X_{ad}/\omega_b & 0 & X_f/\omega_b & X_{ad}/\omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -X_{ad}/\omega_b & 0 & X_{ad}/\omega_b & X_D/\omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -X_{aq}/\omega_b & 0 & 0 & X_Q/\omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -mX/\omega_b & -nX/\omega_b & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\tau_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \tau_E \end{bmatrix},\ D=\begin{bmatrix} R+r_a & -(X_q+X) & 0 & 0 & X_{aq} & 1 & 0 & 0 & 0 \\ X_d+X & R+r_a & -X_{ad} & -X_{ad} & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -r_f & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{X_{ad}}{r_f} \\ 0 & 0 & 0 & -r_D & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -r_Q & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \omega_b X_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ 0 & \omega_b X_c & 0 & 0 & 0 & -\omega_b & 0 & 0 & 0 \\ mR+nX & nR-mX & 0 & 0 & 0 & m & n & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix}$$

$$m=K_a U_{d0}/U_{t0} \tag{7}$$

$$n=K_a U_{q0}/U_{t0} \tag{8}$$

其余各参数的意义参见文献[1]。

2.2 矩阵求逆

由矩阵 C_1 求逆矩阵可得逆矩阵非零元素的分布，从而逆矩阵可由下面矩阵近似表示。

$$C_1^{-1}=\begin{bmatrix} e_{11} & 0 & e_{13} & e_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{22} & 0 & 0 & e_{25} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{31} & 0 & e_{33} & e_{34} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ e_{41} & 0 & e_{43} & e_{44} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & e_{52} & 0 & 0 & e_{55} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ e_{81} & e_{82} & e_{83} & e_{84} & e_{85} & 0 & 0 & -1/\tau_A & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\tau_E \end{bmatrix}$$

可见非零元素 $e_{ij}(i\leqslant5,j\leqslant5)$ 只与系统的阻抗参数有关，和系统的其他参数无关；而 $e_{8j}(j=1\sim5)$ 则与系统的运行方式有关。

2.3 系统阻尼计算

计算 $C_1^{-1}D$ 的值并将其对角元素和 A_1,A_4 的对角元素相加，得系统的对角元素之和即系统阻尼之和为

$$\sigma=-D_1/M_1-D_2/M_2-D_3/M_3-D_4/M_4-D_5/M_5-D_6/M_6-1/\tau_{CH}-1/\tau_{RH}-1/\tau_{CO}-1/\tau_{SR}-1/\tau_{SM}+e_{11}(R+r_a)+e_{22}(R+r_a)-e_{33}r_f-e_{44}r_D-e_{55}r_Q-1/\tau_A-1/\tau_E$$

式中 D_i 和 M_i 分别为轴系的阻尼系数和惯性时间常数；$e_{ii}(i=1\sim5)$ 是只与系统阻抗参数有关的量；其他参数同前。

$$C_1^{-1}D=\begin{bmatrix} e_{11}(R+r_a) & -e_{11}(X_q+X) & -e_{13}r_f & -e_{14}r_D & e_{11}X_{aq} & e_{11} & 0 & 0 & e_{13}r_f/X_{ad} \\ e_{22}(X_d+X) & e_{22}(R+r_a) & -e_{22}X_{ad} & -e_{22}X_{ad} & -e_{25}r_Q & 0 & e_{22} & 0 & 0 \\ e_{31}(R+r_a) & -e_{31}(X_q+X) & -e_{33}r_f & -e_{34}r_D & e_{31}X_{aq} & e_{31} & 0 & 0 & e_{33}r_f/X_{ad} \\ e_{41}(R+r_a) & -e_{41}(X_q+X) & -e_{43}r_f & -e_{44}r_D & e_{41}X_{aq} & e_{41} & 0 & 0 & e_{43}r_f/X_{ad} \\ e_{52}(X_d+X) & e_{52}(R+r_a) & -e_{52}X_{ad} & -e_{52}X_{ad} & -e_{55}r_Q & 0 & e_{52} & 0 & 0 \\ \omega_b X_c & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \omega_b & 0 & 0 \\ 0 & \omega_b X_c & 0 & 0 & 0 & -\omega_b & 0 & 0 & 0 \\ a & b & c & d & f & h & k & -1/\tau_A & e_{83}r_f/X_{ad} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1/\tau_E & -1/\tau_E \end{bmatrix}$$

$$a=e_{81}(R+r_a)+e_{82}(X_d+X)-(mR+nX)/\tau_A,\qquad c=-e_{82}X_{ad}-e_{83}r_f$$

$$b=-e_{81}(X_q+X)+e_{82}(R+r_a)-(-mX+nR)/\tau_A,\qquad d=-e_{82}X_{ad}-e_{84}r_D$$

$$f=e_{81}X_{aq}-e_{85}r_Q,\qquad h=e_{81}-m/\tau_A,\qquad k=e_{82}-n/\tau_A$$

以上各参数的值均与系统的运行方式无关，故系统的总阻尼守恒，不随励磁放大倍数以及汽轮机各缸出力比例的变化而变化。

3 实例计算分析

3.1 系统分析

对 IEEE 第一基准模型简化后的系统，其参数如下所示(除时间常数单位为 s 外，其余均为标么值)。

同步电机：$x_{ad}=1.660$；$x_d=1.790$；$x_f=1.700$；$x_D=1.666$；$x_{aq}=1.580$；$x_q=1.710$；$x_Q=1.695$；$r_f=0.001$；$r_D=0.0037$；$r_Q=0.0053$；$r_a=0.0015$。

励磁机和电压调节器：$K_a=50$；$\tau_A=0.01$；$\tau_E=0.002$。

输电线路及变压器：$R_T=0.01$；$X_T=0.14$；$R_L=0.02$；$X_L=0.56$。

同步电机的起始运行条件：$P_e=0.9$；$U_{t0}=1.05$；$\lambda=\cos\phi=0.9$(滞后)。

轴系的惯性时间常数和刚度常数参见文献[6]，汽轮机转矩系数和调速器参数见文献[4]，轴系阻尼参数见文献[7]。对系统实施特征根分析，得系统在不同情况下的特征根，在此仅取其中低频振荡、次同步振荡和对应电容振荡 7 种振荡模式进行比较，结果如表 1 所示。

由表 1 结果可见，系统运行方式的变化不会影响系统总阻尼，但对各个振荡模式的阻尼还是有一定影响。首先励磁放大倍数的变化对次同步振荡模式没

表 1　未加 PSS 时系统的特征根分析

Tab.1 Eigenvalue analysis of system without PSS

振荡模式	初始条件下	励磁放大倍数降为 30	发电机发出有功降为 0.7 p.u.	发电机端电压降为 1.0 p.u.	功率因数降为 0.8
对应电容 C 振荡	−6.49±212.62 i	−6.50±212.62 i	−6.80±212.62 i	−6.44±212.71 i	−6.38±212.90 i
次同步振荡	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i
	−0.55±203.64 i	−0.55±203.64 i	−0.34±203.61 i	−0.60±203.56 i	−0.66±203.44 i
	−0.20±160.68 i	−0.20±160.68 i	−0.17±160.70 i	−0.20±160.66 i	−0.20±160.64 i
	−0.12±127.04 i	−0.12±127.04 i	−0.11±127.04 i	−0.12±127.03 i	−0.12±127.03 i
	−0.21±99.27 i	−0.21±99.27 i	−0.17±99.31 i	−0.21±99.20 i	−0.21±99.18 i
低频振荡	−0.25±9.61 i	−0.40±9.56 i	−0.52±9.87 i	−0.12±9.03 i	−0.21±8.94 i
系统总阻尼	−693.649 1	−693.649 1	−693.649 1	−693.649 1	−693.649 1

有任何影响,而低频振荡模式阻尼则由于励磁放大倍数的减小而增加了,振荡模式更趋于稳定;发电机有功功率变小会对次同步振荡模式造成不良影响,但是低频振荡模式阻尼却得到了加强;功率因数和端电压的降低,使得次同步振荡其中的一个模式阻尼增加,其余基本保持不变,但低频振荡模式阻尼减小。由此可见,低频振荡和次同步振荡有着不可共容性。所以,在调控发电机出力时,必须考虑低频振荡和次同步振荡的双重效果,这样才能保证系统真正的安全稳定运行。

3.2　PSS 对系统阻尼影响

3.2.1　PSS 对系统总阻尼影响

因统一模型包含的低频振荡模式阻尼较小,为保证系统的安全稳定运行,可以考虑加装 PSS。PSS 参数的设计一般要求机电模式阻尼比 $\zeta>(0.1\sim0.3)$,设计 2 阶 PSS 系统的参数,传递函数如图 5 所示。

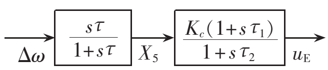

图 5　PSS 传递函数框图

Fig.5 Transfer function block diagram of PSS

将 PSS 加进系统后,系统状态方程发生变化,状态变量变为 28 个,即增加了附加励磁控制的 X_5 和 u_E。对加入 PSS 后的系统进行分析,矩阵 $\boldsymbol{A}$ 保持不变,矩阵 $\boldsymbol{C}_1^{-1}\boldsymbol{D}$ 的对角元素之和增加了 $-1/\tau-1/\tau_2$,即加入 PSS 后系统阻尼变为

$$\sigma=-D_1/M_1-D_2/M_2-D_3/M_3-D_4/M_4-D_5/M_5-D_6/M_6-1/\tau_{CH}-1/\tau_{RH}-1/\tau_{CO}-1/\tau_{SR}-1/\tau_{SM}+e_{11}(R+r_a)+e_{22}(R+r_a)-e_{33}r_f-e_{44}r_D-e_{55}r_Q-1/\tau_A-1/\tau_E-1/\tau-1/\tau_2$$

因附加励磁控制的 τ 和 τ_2 可最先确定,可认为与系统运行方式无关,即系统阻尼依然守恒。

3.2.2　PSS 对振荡模式阻尼影响

根据低频振荡的阻尼特性及阻尼比的要求,设计的 PSS 参数为

$$\tau_2=0.02\ \text{s},\ \tau=5\ \text{s},\ \tau_1=0.4\ \text{s},K_c=3$$

对加入 PSS 的系统进行特征根分析,在此也仅取其中低频振荡、次同步振荡和对应电容振荡 7 种振荡模式进行比较,结果如表 2 所示。

由表 2 结果可见,PSS 的加入使得系统总阻尼增加,而且低频振荡模式的阻尼也增加,其阻尼比变为 0.176 9,符合要求;但 PSS 的加入使得次同步振荡模式的阻尼都有所减少,甚至接近负阻尼,加大了发生次同步振荡的可能性。无论 PSS 的 τ_1, K_c 参数和励磁放大倍数如何变化,系统阻尼保持不变,即系统阻尼守恒仍然成立。

表 2　加 PSS 后系统的特征根分析

Tab.2 Eigenvalue analysis of system with PSS

振荡模式	未加 PSS 时	初始 PSS 参数时	加 PSS 后励磁放大倍数降为 30	加 PSS 后超前时间常数 τ_1 升为 0.6 s	PSS 放大倍数 K_c 升为 5
对应电容 C 振荡	−6.49±212.62 i	−6.64±212.62 i	−6.59±212.62 i	−6.71±212.62 i	−6.74±212.62 i
次同步振荡	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i
	−0.55±203.64 i	−0.42±203.62 i	−0.47±203.63 i	−0.36±203.61 i	−0.34±203.61 i
	−0.20±160.68 i	−0.16±160.69 i	−0.18±160.68 i	−0.14±160.69 i	−0.13±160.69 i
	−0.12±127.04 i	−0.10±127.04 i	−0.11±127.04 i	−0.10±127.04 i	−0.10±127.04 i
	−0.21±99.27 i	−0.01±99.36 i	−0.09±99.32 i	0.08±99.40 i	0.12±99.41 i
低频振荡	−0.25±9.61 i	−1.74±9.68 i	−1.25±9.84 i	−2.65±9.27 i	−3.11±9.46 i
系统总阻尼	−693.649 1	−743.849 1	−743.849 1	−743.849 1	−743.849 1

从表 2 还可看出,在加装了 PSS 的系统中调节励磁放大倍数效果与不加 PSS 时完全不同,励磁放大倍数的变化对次同步振荡模式阻尼造成影响,且随着励磁放大倍数的减少次同步振荡模式阻尼增加,低频振荡模式阻尼则减少;超前时间常数 τ_1 和放大倍数 K_c 的变化对低频振荡模式阻尼和次同步振荡模式阻尼的影响也完全不同,所以在加装了 PSS 的系统中调节 PSS 参数和励磁系统参数时,要尤其注意对次同步振荡模式的不利影响。

3.3　发电机运行参数变化对系统阻尼影响

3.3.1　发电机出力对系统阻尼影响

随着系统运行工况的变化,为了维持电网即时的

输入-输出平衡,发电机的出力是实时变化的。前面在研究发电机出力对系统的阻尼影响时,只列出了一种情况,下面对其实施进一步分析可得结果如表3所示,同理也只列出低频振荡、次同步振荡和对应电容振荡7种振荡模式进行比较。

从表3可以看出,次同步振荡有5种振荡模式:

表3 发电机出力对系统振荡模式阻尼的影响

Tab.3 The influence of generator active power on oscillation damping

振荡模式	原始参数情况	发电机出力		
		0.7 p.u.	0.3 p.u.	0.1 p.u.
对应电容 C 振荡	−6.49±212.62 i	−6.80±212.62 i	−7.34±212.72 i	−7.57±212.79 i
次同步振荡	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i
	−0.55±203.64 i	−0.34±203.61 i	0.02±203.49 i	0.17±203.41 i
	−0.20±160.68 i	−0.17±160.70 i	−0.12±160.71 i	−0.10±160.71 i
	−0.12±127.04 i	−0.11±127.04 i	−0.10±127.04 i	−0.10±127.04 i
	−0.21±99.27 i	−0.17±99.31 i	−0.10±99.35 i	−0.06±99.35 i
低频振荡	−0.25±9.61 i	−0.52±9.87 i	−1.08±10.09 i	−1.30±10.11 i
系统总阻尼	−693.649 1	−693.649 1	−693.649 1	−693.649 1

298.18,203.64(次高频),160.68,127.04(次低频)和99.27。随着发电机出力的下降,次同步振荡模式的阻尼均成下降趋势,且在由正阻尼变为负阻尼的过程中,次高频的下降最快,次低频的下降最慢,甚至于变化不太大。

所以在调控发电机出力时,可以只关注主要模式即次高频模式的阻尼变化,只要保证其不变为负阻尼,其他模式阻尼肯定不会变为负的,可以先不用考虑。另外,随着发电机出力的下降,对应电容的振荡频率上升,轴系的扭振模式频率下降,频率互补的可能性增加,加大了发生次同步振荡的可能性。

3.3.2 发电机功率因数变化对系统阻尼影响

为保证系统的有功和无功平衡,维持发电机端电压水平,发电机的功率因数是可以调节的。基于功率因数的调节,特征根分析结果如表4所示。

从阻尼角度考虑,随着发电机功率因数的降低,

表4 发电机功率因数的变化对系统振荡模式阻尼的影响

Tab.4 The influence of power factor on oscillation damping

振荡模式	原始参数情况	发电机功率因数			
		0.6	0.5	0.4	0.2
对应电容 C 振荡	−6.49±212.62 i	−6.15±213.55 i	−6.01±214.02 i	−7.78±214.95 i	−9.51±212.15 i
次同步振荡	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i	0.00±298.18 i
	−0.55±203.64 i	−0.87±202.98 i	−1.00±202.65 i	0.06±201.90 i	1.64±203.74 i
	−0.20±160.68 i	−0.21±160.55 i	−0.21±160.48 i	0.00±160.42 i	0.07±161.04 i
	−0.12±127.04 i	−0.12±127.01 i	−0.12±126.99 i	−0.08±126.98 i	−0.07±127.13 i
	−0.21±99.27 i	−0.21±98.96 i	−0.21±98.79 i	0.12±98.69 i	0.18±100.35 i
低频振荡	−0.25±9.61 i	−0.06±7.10 i	−0.10±5.27 i	−2.29±2.87 i	0.45±16.32 i
系统总阻尼	−693.649 1	−693.649 1	−693.649 1	−693.649 1	−693.649 1

初始阶段,次同步振荡模式的阻尼呈上升趋势,尤其是次高频模式阻尼增加最快;对应电容的振荡模式阻尼有所降低;低频振荡模式阻尼随着功率因数降低也急剧下降,变为负阻尼。当运行在此工况时,发生低频振荡的可能性增加。随着功率因数的进一步下降,低频振荡和次同步振荡模式阻尼都发生了突变,次同步模式阻尼大幅度减少,有的甚至由正变负;而低频振荡模式阻尼则由负变正,此时次同步振荡成为关注的主要对象。随着功率因数的进一步减少,2种振荡模式的阻尼均呈减少趋势。在阻尼的变化过程中,虽然次同步振荡模式的总阻尼变化不是很规律,但可以肯定的一点是次同步振荡各个模式遵循相同的阻尼变化趋势,只是变化的幅度有大有小。无论系统各个模式阻尼如何变化,在阻尼守恒的前提下,随着系统参数的变化,阻尼在各个模式之间转移并最终达到平衡。从振荡频率角度看,低频振荡和次同步振荡的振荡频率都是先降低后升高的,与对应电容的振荡模式的频率变化正好相反,不过频率的变化与阻尼的变化不同步,所以要注意对应电容的振荡频率和次同步振荡模式频率互补的发生。

4 结论

a. 通过对低频振荡和次同步振荡的统一建模分析,得出系统阻尼守恒的结论,系统阻尼不随励磁系统放大倍数的变化而变化,不随汽轮机各缸出力比例的变化而变化,跟发电机出力和功率因数的变化无关。

b. 系统阻尼因为PSS的加入而增加,但系统阻尼守恒依然成立。PSS的加入会增加低频振荡模式的阻尼,但对次同步振荡模式阻尼则表现出危害性。

c. 在加和不加PSS的系统中,励磁放大倍数的变化对振荡模式阻尼的影响是不一样的。未加PSS时,励磁放大倍数的变化对次同步模式阻尼没有任何影响,加PSS后次同步模式阻尼则随着励磁放大倍数的减小而增加;在未加PSS时低频振荡模式阻尼

由于励磁放大倍数的减小而增加，加了 PSS 后情况则相反。

d. 发电机有功功率、端电压、功率因数、PSS 的超前时间常数 τ_1、放大倍数 K_c 的变化对系统总阻尼没有任何影响，但对低频振荡模式阻尼和次同步振荡模式阻尼的影响刚好相反，说明了低频振荡和次同步振荡的不可共容性，为保证系统的安全稳定运行，必须在调节以上参数时考虑对低频振荡和次同步振荡的双重影响。

e. 在调控发电机运行工况时，次同步振荡模式中次高频变化最明显，当发电机出力下降时，可以只关注次高频模式阻尼的变化。在调节发电机功率因数时，随着功率因数的下降，低频振荡和次同步振荡的阻尼变化规律基本相反，但振荡频率变化规律相同。在整个系统运行工况的变化过程中，次同步振荡各模式遵循相同的变化趋势，只是变化的幅度不同。

参考文献：

[1] 余耀南. 动态电力系统[M]. 北京：水利电力出版社，1985.

[2] 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.

[3] 胡云花，赵书强. 电力系统低频振荡和次同步振荡的阻尼耦合分析[J]. 电力自动化设备，2004，24(9)：15－17.
HU Yun-hua，ZHAO Shu-qiang. Analysis of damping coupling relation between LFO and SSO of power system[J]. **Electric Power Automation Equipment**，2004，24(9)：15－17.

[4] IEEE Committee. Dynamic models for steam and hydro turbines in power system[J]. **IEEE Trans. on PAS**，1973，92(6)：1904－1915.

[5] 李凌志，赵书强，潘云江，等. 多机电力系统振荡模式阻尼分配与传递[J]. 华北电力大学学报，2001，28(2)：19－23.
LI Ling-zhi，ZHAO Shu-qiang，PAN Yun-jiang，*et al*. Damping apportionment and transference of oscillation modes in multi-machine power system[J]. **Journal of North China Electric Power University**，2001，28(2)：19－23.

[6] IEEE SSR Task Force. First besckmark model for computer simulation of subsynchronous resonance[J]. **IEEE Trans. on PAS**，1977，96(5)：1565－1572.

[7] 黄家裕，张　益，孙德昌. 用于机电耦合研究的汽轮发电机轴系模型[J]. 电力系统自动化，1998，22(7)：30－34.
HUANG Jia-yu，ZHANG Yi，SUN De-chang. Turbine-generator shaft model used in electro-mechanical interaction researches[J]. **Automation of Electric Power Systems**，1998，22(7)：30－34.

[8] 任福春，杨　昆，宋之平. 大型汽轮发电机组轴系扭振耦合问题[J]. 华北电力大学学报，1996，23(3)：30－35.
REN Fu-chun，YANG Kun，SONG Zhi-ping. Couple problems in torsional vibration of large turbine-generator shaft system[J]. **Journal of North China Electric Power University**，1996，23(3)：30－35.

[9] 吴俊勇，肖东晖，程时杰，等. 特征结构分析及在电力系统次同步谐振研究中的应用[J]. 电力系统自动化，1997，21(11)：1－3.
WU Jun-yong，XIAO Dong-hui，CHENG Shi-jie，*et al*. Eigen structure analysis and its application to the study of power system[J]. **Automation of Electric Power Systems**，1997，21(11)：1－3.

（**责任编辑**：李育燕）

作者简介：

胡云花（1979－），女，山东潍坊人，硕士，主要研究方向为电力系统运行、分析与控制（**E-mail**：huflower2002@126.com）；

赵书强（1964－），男，河北景县人，教授，博士，主要从事电力系统稳定分析与控制、电力系统谐波分析的教学与研究工作；

马燕峰（1978－），女，河北唐山人，助教，硕士，主要从事电力系统运行、分析与控制的教学和研究工作；

黄常抒（1979－），男，壮族，广西邕宁人，助理工程师，从事电力系统的运行维护工作。

Damping analysis of unified LFO & SSO model in power system

HU Yun-hua[1]，ZHAO Shu-qiang[2]，MA Yan-feng[2]，HUANG Chang-shu[3]

(1. Zhuhai Electric Power Design Institute，Zhuhai 519000，China；
2. School of Electrical Engineering，North China Electric Power University，Baoding 071003，China；3. Guangdong Guohua Yuedian Taishan Power Generation Co.，Ltd.，Taishan 529228，China)

Abstract：The damping coupling between LFO(Low Frequency Oscillation) and SSO(SubSynchronous Oscillation) may occur in power system. The suppression of LFO by PSS(Power System Stabilizer) may cause SSO. With the consideration of system damping，a unified model is built for both LFO and SSO by using the small disturbance approach. The damping variety rule is analyzed as well. Applying the eigenvalue approach to an example，the influences of PSS，excitation amplification，generator active power and power factor on damping of different oscillation modes are analyzed and compared. Results verify the conservation of system damping and the incompatibility of LFO and SSO. When regulating above parameters，their dual influences on LFO and SSO should be considered.

Key words：power system；low frequency oscillation；subsynchronous oscillation；damping；eigenvalue