

基于降阶算法的电力系统稳定器分段设计

大规模电力系统中，PSS的协调设计往往需要计算多次系统的机电振荡模式。由于系统的规模较大，状态矩阵的阶数很高，常规计算矩阵特征值方法会遇到因数值困难而报错的问题。为了解决这一问题，提出一种利用降阶矩阵间接计算系统机电振荡模式的方法，并将其应用在PSS的分段协调整定过程中。PSS的分段协调设计的过程分为两个阶段：一是进行目标优化，搜索令振荡模式移到目标位置时PSS应提供的阻尼转矩系数；二是利用相位补偿原理确定PSS的增益与时间常数。最后给出了一个四机两区电力系统的应用计算和仿真结果。

杨 林¹ 苏田宇² 蔡 晖³ 杜文娟²/1.国家电网江苏省电力公司 2.华北电力大学电气与电子工程学院 3.国家电网江苏省电力公司经济技术研究院

0 引言

低频振荡现象最早出现在20世纪60年代的美国，之后在其他国家相继出现。按照频率范围可将低频振荡分为局部振荡模式（Local Mode，0.5~2.5 Hz）和区域振荡模式（Inter-Area Mode，0.2~0.5 Hz）。F. P. Demello提出了阻尼转矩分析理论^[1]，将发电机电磁功率分为与转子角同相位的同步转矩和与转速同相位的阻尼转矩。同时，Demello使用该理论对发电机及其励磁系统进行阻尼转矩分析，并认为低频振荡是由发电机阻尼转矩为负导致的，而安装电力系统稳定器（PSS）可以为发电机提供正的阻尼转矩。电力系统稳定器是附加在发电机励磁系统上的控制器，通常以转速、功率以及频率为输入信号。电力系统稳定器已被证明是阻尼低频振荡最有效、经

济的装置，对局部振荡模式和区域间振荡模式均有较好的效果^[2]。在PSS设计初期，采用顺序整定的方法，即在整定完一个PSS的参数之后再去整定下一个PSS的参数。然而，运行人员发现，后整定的PSS在投入运行之后会使前一个PSS配置的振荡模式发生偏移，这便是“特征值漂移”现象^[3]。为了解决这一问题，研究人员采用协同整定的方法设计PSS的参数。常用的协同整定PSS的方法分为数学方法和启发式方法两大类。数学方法包括线性规划^[4]、非线性规划^[5]和其他最优化数学算法。启发式算法包括遗传算法^[6]、模拟退火算法^[7]和粒子群算法^[8]等。无论是采用哪一种PSS设计方法，都需要计算电力系统状态矩阵特征值和特征向量，确定系统的机电振荡模式。

在电力系统中，计算系统状态矩阵特征值和特征向量常用的方法是QR分解法。QR分解法可以直接计算矩阵的全部特征值，而这在多机电力系统模态分析中并不是必要的。因为电力系统模式分析只关注与系统机电振荡模式相关的特征值及特征向量，所以QR方法的大部分计算结果是多余的。当电力系统中发电机数目很多时，其状态矩阵的维数会很高，此时使用QR方法会因遇到数值困难的问题而无法进行。因此，研究和开发快速有效的大规模电力系统振荡模式的数值算法是一项极为重要的工作，它已经成为电力系统稳定性分析的一个重要研究领域。本文提出一种基于降阶矩阵计算电力系统机电振荡模式的方法，并将其应用到多机系统中进行PSS协调整



杨 林/高级工程师

关键词/Keywords

机电振荡模式 ·
分段协调设计 ·
降阶算法 ·
阻尼转矩系数 ·
相位补偿 ·

国网公司科技资助项目（SGJS0000FZJS1501126），
国家电网公司科技项目（GHJS1500008）。

定。该方法无须计算状态矩阵所有特征值，同时也可以降低计算维度。

1 降阶模态分析法

降阶模态分析使用降阶矩阵来计算电力系统振荡模式，而不是直接计算系统的高维状态矩阵的全部特征值，它是一种提高计算效率、避免数值困难的方法。

N 机电力系统Heffron-Phillips模型^[9]如图1所示，图中系统的状态方程为

$$\begin{aligned} s\Delta\delta &= \omega_0 I \Delta\omega \\ s\Delta\omega &= M^{-1}(-G_1\Delta\delta - G_2\Delta E'_q - D\Delta\omega) \\ s\Delta E'_q &= T_{d0}^{-1}(-G_3\Delta E'_q - G_4\Delta\delta + \Delta E'_{fd}) \\ s\Delta E'_{fd} &= -T_a^{-1}\Delta E'_{fd} + T_a^{-1}K_a(-G_5\Delta\delta - G_6\Delta E'_q + \Delta u_{pss}) \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} \Delta\omega &= \begin{bmatrix} \Delta\omega_1 & \Delta\omega_2 & \cdots & \Delta\omega_N \end{bmatrix}^T \\ \Delta E'_{fd} &= \begin{bmatrix} \Delta E'_{fd1} & \Delta E'_{fd2} & \cdots & \Delta E'_{fdN} \end{bmatrix}^T \\ \Delta E'_q &= \begin{bmatrix} \Delta E_{q1} & \Delta E_{q2} & \cdots & \Delta E_{qN} \end{bmatrix}^T \\ \Delta u_{pss} &= \begin{bmatrix} \Delta u_{pss1} & \Delta u_{pss2} & \cdots & \Delta u_{pssN} \end{bmatrix}^T \\ M &= \text{diag}(M_n) \quad D = \text{diag}(D_n) \quad T'_{d0} = \text{diag}(T'_{d0n}) \\ X'_d &= \text{diag}(x'_{dn}) \quad X_q = \text{diag}(x_{qn}) \quad X_d = \text{diag}(x_{dn}) \\ T_A &= \text{diag}(T_{An}) \quad K_A = \text{diag}(K_{An}) \\ n &= 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (2)$$

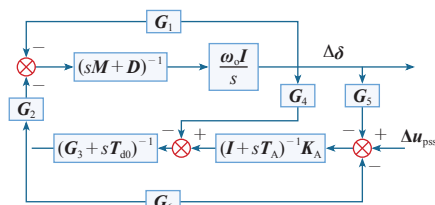


图1 N 机电力系统Heffron-Phillips模型

为了方便分析，暂时不考虑PSS对系统的影响，此时式(1)可写为

$$\begin{aligned} s\Delta\delta &= \omega_0 I \Delta\omega \\ s\Delta\omega &= M^{-1}(-G_1\Delta\delta - G_2\Delta E'_q - D\Delta\omega) \\ s\Delta E'_q &= T_{d0}^{-1}(-G_3\Delta E'_q - G_4\Delta\delta + \Delta E'_{fd}) \\ s\Delta E'_{fd} &= -T_a^{-1}\Delta E'_{fd} + T_a^{-1}K_a(-G_5\Delta\delta - G_6\Delta E'_q) \end{aligned} \quad (3)$$

联立以上方程可以得到降阶方程，即

$$\{s^2 M + sD + \omega_0 G_1 - G_2[(I + sT_a)(G_3 + sT'_{d0}) + K_a G_6]^{-1}[(I + sT_a)G_4 + K_a G_5]\} \Delta\delta = H(s) \Delta\delta = 0 \quad (4)$$

如果 $\bar{\lambda}_i$ 是系统的机电振荡模式，则 $\bar{\lambda}_i$ 也应满足方程

$$\text{DET}[H(\bar{\lambda}_i)] = 0 \quad (5)$$

式中，DET为求取矩阵的行列式。

在电力系统小干扰功角稳定性分析与控制中，所关注的振荡模式通常是弱阻尼的，非常接近复平面的虚轴。而机电振荡模式的振荡角频率常常与其自然振荡频率接近，自然振荡频率是由矩阵 $-\omega_0 M^{-1} G_1$ 特征值计算获得的。实际上，在 N 机电力系统中，所有发电机线性化的转子运动方程为(忽略 D)

$$\begin{pmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \omega_0 I \\ G_1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \end{pmatrix} \quad (6)$$

上述系统的特征方程为

$$\left| \lambda I - \begin{pmatrix} 0 & \omega_0 I \\ G_1 & 0 \end{pmatrix} \right| = |\lambda I - A_r| = 0 \quad (7)$$

式(6)的等价形式是

$$(s^2 M + \omega_0 G_1) \Delta\delta = (s^2 I + \omega_0 M^{-1} G_1) \Delta\delta = 0 \quad (8)$$

因此，系统状态矩阵 A_r 的 $2N$ 个特征值也是下面方程的解

$$|s^2 I + \omega_0 M^{-1} G_1| = 0 \quad (9)$$

所以，如果矩阵 $-\omega_0 M^{-1} G_1$ 的 N 个特征值为 η_i ， $i=1, 2, \dots, N$ ，那么矩阵 A_r 的 $2N$ 个特征值为 $v_i = \pm\sqrt{\eta_i}$ ， $i=1, 2, \dots, N$ 。可以证明 $-\omega_0 M^{-1} G_1$ 的所有特征值除了一个为零的特征值外，其余均为负实数。因此，矩阵 A_r 的 $(2N-2)$ 个特征值是 $N-1$ 对共轭虚根 $v_i = \pm i\sqrt{\eta_i}$ ， $i=1, 2, \dots, N-1$ 。实际上，当仅仅考虑发电机的转子运动方程时，它们是电力系统的 $N-1$ 个机电振荡模式。 $\sqrt{\eta_i} \neq 0$ ， $i=1, 2, \dots, N-1$ 是机电振荡模式的 $N-1$ 个自然振荡角频率。

对于一个弱阻尼的振荡模式 $\bar{\lambda}_i = \xi_i \pm j\omega_i$ ，因为其接近于复平面的虚轴且其角频率 ω_i 接近自然振荡角频率 $\sqrt{\eta_i}$ ， $\bar{\lambda}_i(0) = 0 + j\sqrt{\eta_i}$ 应该是对振荡模式 $\bar{\lambda}_i = \xi_i \pm j\omega_i$ 的一个较为接近的估计。因此，可以建立以下目标函数

$$f(\lambda) = |\text{DET}[H(\lambda)]| \quad (10)$$

式(10)中的 $F(\lambda)$ 在式(1)中给出，

$\text{DET}[\mathbf{M}]$ 表示矩阵 $\mathbf{M}$ 的行列式。借助直接搜索方法可以在复平面内从 $0 + j\sqrt{\eta_i}$ 开始寻找上述目标函数最小化的最优解,获得振荡模式 $\bar{\lambda}_i = \xi_i \pm j\omega_i$ 。直接搜索方法可以通过反复交替沿着虚轴和实轴方向搜索来实现,如果 $\bar{\lambda}_i = \xi_i \pm j\omega_i$ 非常接近 $0 + j\sqrt{\eta_i}$,那么最优搜索可以在若干搜索后找到 $\bar{\lambda}_i = \xi_i \pm j\omega_i$ 。

若考虑到PSS,根据式(1)可以得到

$$\{s^2 \mathbf{M} + s\mathbf{D} + \omega_0 \mathbf{G}_1 - \mathbf{G}_2[(\mathbf{I} + s\mathbf{T}_a)(\mathbf{G}_3 + s\mathbf{T}'_{d0}) + \mathbf{K}_a \mathbf{G}_6]^{-1}[(\mathbf{I} + s\mathbf{T}_a)\mathbf{G}_4 + \mathbf{K}_a \mathbf{G}_5]\} \Delta \delta + \mathbf{G}_2[(\mathbf{I} + s\mathbf{T}_a)(\mathbf{G}_3 + s\mathbf{T}'_{d0}) + \mathbf{K}_a \mathbf{G}_6]^{-1} \mathbf{K}_a \Delta \mathbf{u}_{\text{pss}} = 0 \quad (11)$$

假设 N 机电力系统中第 n 台PSS的传递函数为 $T_n(s)$,反馈信号为 $\Delta \omega_n$, $\Delta \mathbf{u}_{\text{pss}}$ 可以表示为

$$\Delta \mathbf{u}_{\text{pss}} = \frac{s}{\omega_0} \mathbf{T}_{\text{pss}}(d, s) \Delta \delta \quad (12)$$

式中, $\mathbf{T}_{\text{pss}}(d, s) = \text{diag}(T_{\text{pss}n})$, d 为PSS的参数组成的向量。当第 k 台发电机装设PSS时 $T_{\text{pss}n} = T_n(s)$,否则 $T_{\text{pss}n} = 0$ 。由式(11)可得

$$\{s^2 \mathbf{M} + s\mathbf{D} + \omega_0 \mathbf{G}_1 - \mathbf{G}_2[(\mathbf{I} + s\mathbf{T}_a)(\mathbf{G}_3 + s\mathbf{T}'_{d0}) + \mathbf{K}_a \mathbf{G}_6]^{-1}[(\mathbf{I} + s\mathbf{T}_a)\mathbf{G}_4 + \mathbf{K}_a \mathbf{G}_5 - \mathbf{K}_a \frac{s}{\omega_0} \mathbf{T}_{\text{pss}}(d, s) \Delta \delta]\} \Delta \delta = \mathbf{H}(d, s) \Delta \delta = 0 \quad (13)$$

如果 $\bar{\lambda}_i$ 是系统机电振荡模式,则 $\bar{\lambda}_i$ 应满足下式

$$\text{DET}[\mathbf{H}(d, \bar{\lambda}_i)] = 0 \quad (14)$$

因此,也可以通过直接寻优法搜索装有PSS时电力系统的机电振荡模式。降阶矩阵的维度等于系统中发电机台数,是初始状态矩阵维度的1/4,适用于求取实际大系统的机电振荡模式。

2 PSS分段式设计

多机系统中往往需要安装多个PSS抑制系统多个低频振荡模式。然而,为了避免“特征值漂移”问题,本文使用分段协调设计方法整定PSS的参数。PSS的分段式设计主要分为两个阶段:首先通过寻优算法确定每台PSS应向其所在发电机机电回路提供的阻尼转矩系数 D ;然后利用相位补偿法确定每台PSS的增益和时间常数。

在多机电力系统中,安装多台PSS的目的是为关注的振荡模式提供充足的阻尼比。通常,将振

荡模式移到准确的目标位置是不必要的。因此,可以将所有关注的振荡模式阻尼比大于某一数值作为目标函数,进行多PSS协调设计。如采用以下目标函数

$$f(d) = \min(\xi_i) \geq 0.1 \quad (15)$$

式中,因 $\bar{\lambda}_i = \alpha_i \pm j\beta_i$ 是关注的第 i 个机电振荡模式,

$$\xi_i = -\frac{\alpha_i}{\sqrt{\alpha_i^2 + \beta_i^2}}$$

为该模式的阻尼比。

该目标函数可以保证系统中所有关注的机电模式的阻尼比均大于0.1。

由式(14)可知,存在两个非零向量 $\bar{R}_i$ 和 $\bar{L}_i$ 满足以下方程,即

$$\begin{aligned} \mathbf{H}(d, \bar{\lambda}_i) \bar{R}_i &= 0 \\ \bar{L}_i^T \mathbf{H}(d, \bar{\lambda}_i) &= 0 \end{aligned} \quad (16)$$

假设 $d = [d_1 \ d_2 \ \cdots \ d_z]^T$, d_k 的增量为 Δd_k ,将会造成 $\bar{\lambda}_i$ 和 $\bar{R}_i$ 的增量为 $\Delta \bar{\lambda}_i$ 和 $\Delta \bar{R}_i$ 。即 $\mathbf{H}[d(d_k + \Delta d_k), \bar{\lambda}_i + \Delta \bar{\lambda}_i](\bar{R}_i + \Delta \bar{R}_i) = 0$ 。

由于

$$\begin{aligned} &\mathbf{H}[d(d_k + \Delta d_k), \bar{\lambda}_i + \Delta \bar{\lambda}_i] \\ &= \mathbf{H}(d, \bar{\lambda}_i) + \frac{\partial \mathbf{H}(d, \bar{\lambda}_i)}{\partial \bar{\lambda}_i} \Delta \bar{\lambda}_i + \frac{\partial \mathbf{H}(d, \bar{\lambda}_i)}{\partial d_k} \Delta d_k \end{aligned} \quad (17)$$

则有

$$\frac{\partial \bar{\lambda}_i}{\partial d_k} = -\frac{\bar{L}_i^T \frac{\partial \mathbf{H}(d, \bar{\lambda}_i)}{\partial d_k} \bar{R}_i}{\bar{L}_i^T \frac{\partial \mathbf{H}(d, \bar{\lambda}_i)}{\partial \bar{\lambda}_i} \bar{R}_i} \quad (18)$$

若采用最速下降法搜索最优解,则有

$$d(m+1) = d(m) - \text{st} \times \nabla f[d(m)] \quad (19)$$

式中, $\nabla f[d(m)] = \sum_{i=1}^2 2(\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_i^*) \frac{\partial \bar{\lambda}_i}{\partial d(m)}$, st为最优搜索步长。 $\frac{\partial \bar{\lambda}_i}{\partial d(m)} = \left(\frac{\partial \bar{\lambda}_i}{\partial d_1} \ \frac{\partial \bar{\lambda}_i}{\partial d_2} \ \cdots \ \frac{\partial \bar{\lambda}_i}{\partial d_z} \right)^T$, $\frac{\partial \bar{\lambda}_i}{\partial d_k} (k=1, 2, \cdots, z)$ 可由式(18)计算得到。

假设在 N 机电力系统中,第 n 个PSS为第 n 台发电机的机电振荡回路提供纯的阻尼转矩 $D_{\text{pss}n} \Delta \omega_n$ ($n=1, 2, \cdots, N$)。若以PSS提供的阻尼转矩系数作为寻优的参数,假设当第 n 台发电机装设PSS时, $\mathbf{D}_{\text{pss}} = \text{diag}(d_{\text{pss}n})$, $d_{\text{pss}n} = D_{\text{pss}n}$, 否则 $d_{\text{pss}n} = 0$ ($n=1, 2, \cdots, N$)。 $d = [D_{\text{pss}1} \ D_{\text{pss}2} \ \cdots \ D_{\text{pss}N}]^T$ 。

假设在最速下降法第 m 次迭代中, 需要根据 $d(m)$ 计算系统中所有机电模式, 并判断目标函数 $f[d(m)]$ 是否大于0.1。在这一过程中可以利用前文提出的降阶算法得到系统的机电模式, 则有

$$\begin{aligned} & \{s^2 \mathbf{M} + s[\mathbf{D} + \mathbf{d}(m)] + \omega_o \mathbf{G}_1 - \\ & \mathbf{G}_2[(\mathbf{I} + s\mathbf{T}_a)(\mathbf{G}_3 + s\mathbf{T}'_{d0}) + \mathbf{K}_a \mathbf{G}_6]^{-1} \\ & [(\mathbf{I} + s\mathbf{T}_a)\mathbf{G}_4 + \mathbf{K}_a \mathbf{G}_5]\} \Delta \delta = \mathbf{H}[(\mathbf{d}(m), s)] \Delta \delta = 0 \end{aligned} \quad (20)$$

然后利用直接搜索法寻找令 $\text{DET}\{\mathbf{H}[\mathbf{d}(m), s]\} = 0$ 的解作为第 m 次迭代中系统的机电振荡模式, 进而计算目标函数。

应用式(14)~式(18)介绍的PSS协调设计方法, 设置每一个PSS提供的阻尼转矩系数, 可以确保系统中每个机电模式的阻尼比均大于0.1, 这便是PSS分段式设计的第一个阶段。

在PSS分段式设计的第二个阶段, 使用相位补偿法^[10]确定每一台PSS的增益和时间常数。假设PSS采用以下结构

$$T_{\text{pss}}(s) = K_{\text{pss}} \frac{sT_w(1+sT_2)(1+sT_4)}{(1+sT_w)(1+sT_1)(1+sT_3)} \quad (21)$$

式中, K_{pss} 为稳定器的增益; T_w 为Washout环节时间常数(一般取10); $T_1 \sim T_4$ 为超前滞后环节的时间常数。

对于第 n 台发电机上的PSS, 如果需要补偿的前向通道传递函数为

$$F_{\text{pssn}}(s) = F_{\text{pssn}} \angle \varphi_n \quad (22)$$

则根据相位补偿法有

$$\begin{cases} K_1 \frac{1+sT_2}{1+sT_1} = \frac{D_{\text{pssn}}}{F_{\text{pssn}}} \angle -\frac{\varphi_n}{2} \\ K_2 \frac{1+sT_4}{1+sT_3} = 1 \angle -\frac{\varphi_n}{2} \end{cases} \quad (23)$$

式中, $s = j\omega_s$, ω_s 为目标振荡模式的角频率; D_{pssn} 为需要PSS提供的阻尼转矩系数; $K_{\text{pss}} = K_1 K_2$ 。

根据式(21)~式(23)可以确定每一台PSS的参数, 这便是PSS分段式设计的第二个阶段。

3 四机两区电力系统算例

以四机两区域电力系统为例, 使用本文提出的基于降阶算法的分段式PSS设计方法协调整定电

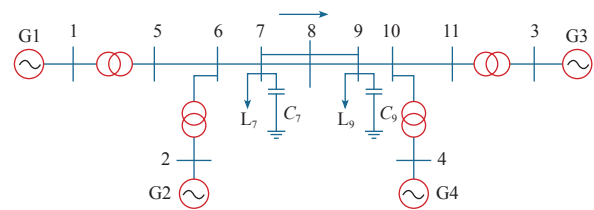


图2 四机两区电力系统

力系统稳定器的参数, 四机两区域电力系统的结构如图2所示。

四机两区电力系统中, 存在3个机电振荡模式: $\bar{\lambda}_1 = -0.1979 + j6.1696$; $\bar{\lambda}_2 = -0.1707 + j6.3459$; $\bar{\lambda}_3 = -0.1641 + j3.2658$ 。它们的振荡频率、阻尼比和参与因子如表1所示。在本文中, 参与因子 p_{in} 表示第 i 个机电振荡模式 $\bar{\lambda}_i$ 对第 n 台发电机转速 ω_n 的灵敏度, p_{in} 越大则说明第 j 台发电机参与第 i 个振荡模式的程度越高。因此, 参与因子通常可以作为选择电力稳定器安装地点的依据。根据表1中的数据, 发电机2对机电振荡模式 $\bar{\lambda}_1$ 的参与因子最大, 发电机4对机电振荡模式 $\bar{\lambda}_2$ 的参与因子最大, 发电机3对机电振荡模式 $\bar{\lambda}_3$ 的参与因子最大。因此选择在发电机2、发电机4和发电机3上安装电力系统稳定器, 抑制机电振荡模式 $\bar{\lambda}_1$ 、 $\bar{\lambda}_2$ 和 $\bar{\lambda}_3$, 可以用较少的控制成本(增益)达到预期的目标(阻尼比)。

表1 系统机电振荡模式与相关信息

振荡模式	$\bar{\lambda}_1 = -0.1979 + j6.1696$	$\bar{\lambda}_2 = -0.1707 + j6.3459$	$\bar{\lambda}_3 = -0.1641 + j3.2658$
振荡频率/Hz	0.982	1.010	0.520
阻尼比	0.032	0.027	-0.050
参与因子	G1	0.208 1	0.000 1
	G2	0.260 8	0.002 8
	G3	0.001 5	0.185 3
	G4	0.000 9	0.276 3

为了方便表达, 将安装在G2、G3和G4上的PSS分别称为PSS2、PSS3和PSS4。若将所有振荡模式的阻尼比提高到0.1或以上, 则选取以下作为目标振荡模式: $\bar{\lambda}_1^* = -0.6201 + j6.1696$; $\bar{\lambda}_2^* = -0.6378 + j6.3190$; $\bar{\lambda}_3^* = -0.3228 \pm j3.2119$ 。

为了将振荡模式移到目标位置, 选择构建如下目标函数

$$f(\mathbf{d}) = \sum_{i=1}^3 [\bar{\lambda}_i(\mathbf{d}) - \bar{\lambda}_i^*(\mathbf{d}^*)]$$

其中， $\mathbf{d} = [D_{\text{pss2}} \ D_{\text{pss3}} \ D_{\text{pss4}}]^T$ 。当 $f(\mathbf{d}) < 10^{-6}$ 时，便可以认为振荡模式到达目标位置。

采用最速下降法求解上述目标函数，下降方向为 $\nabla f[\mathbf{d}(m)] = 2(\bar{\lambda}_i - \bar{\lambda}_i^*) \frac{\partial \bar{\lambda}_i}{\partial \mathbf{d}(m)}$ ，步长st为0.618。

在每一步迭代过程中，采用Hooke-Jeeves方法搜索振荡模式。设置参数初始值为 $\mathbf{d}_0 = [0 \ 0 \ 0]^T$ ，则初始目标函数值为 $f(\mathbf{d}_0) = 0.638 \ 79$ 。经过145次迭代，目标函数收敛至 $f(\mathbf{d}_{145}) = 9.234 \ 7 \times 10^{-9}$ ，参数 $\mathbf{d}_{145} = [170.290 \ 5 \ 232.008 \ 4 \ 19.902 \ 6]^T$ ，机电振荡模式移动到 $\bar{\lambda}'_1 = -0.6201 + j6.169 \ 6$ 、 $\bar{\lambda}'_2 = -0.6378 + j6.319 \ 0$ 、 $\bar{\lambda}'_3 = -0.3281 \pm j3.211 \ 9$ ，十分接近目标振荡模式。因此以170.3、232.0和19.9作为PSS2、PSS3和PSS4需提供的阻尼转矩系数，进行第二阶段的设计。

在机电振荡模式 $\bar{\lambda}_1$ 下，PSS2到G2机电回路前向通道的传递函数为 $\bar{F}_{\text{pss22}}(\bar{\lambda}_1) = -0.273 - j12.706 = 12.71 \angle -91.23^\circ$ 。同样地，模式 $\bar{\lambda}_2$ 下PSS4到G4机电回路前向通道的传递函数为 $\bar{F}_{\text{pss44}}(\bar{\lambda}_2) = -0.776 - j13.545 = 13.57 \angle -93.28^\circ$ ，模式 $\bar{\lambda}_3$ 下PSS3到G3机电回路前向通道的传递函数为 $\bar{F}_{\text{pss33}}(\bar{\lambda}_3) = 9.491 - j12.336 = 15.56 \angle -52.43^\circ$ 。然后根据式(22)所示的相位补偿法，可以得到每台PSS的增益与时间常数，如表2所示。

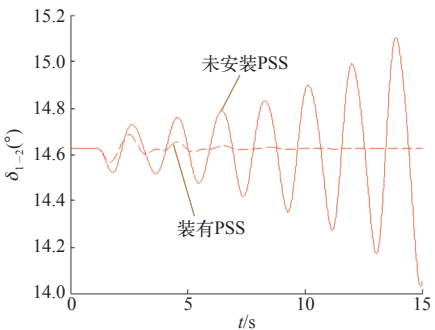
表2 电力系统稳定器的增益与时间常数

	K_{pss}	T_1	T_2	T_3	T_4
PSS2	0.816	0.09	0.732	0.09	0.732
PSS3	1.385	0.09	0.687	0.09	0.687
PSS4	0.089	0.09	0.721	0.09	0.721

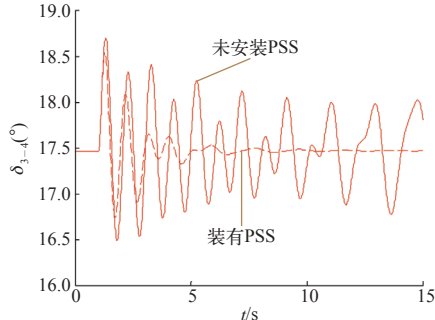
同时安装PSS2、PSS3和PSS4后，系统的机电振荡模式移到 $\bar{\lambda}'_1 = -0.665 \ 8 + j6.110 \ 2$ 、 $\bar{\lambda}'_2 = -0.887 \ 5 + j6.636 \ 4$ 、 $\bar{\lambda}'_3 = -0.347 \ 8 \pm j3.188 \ 2$ 。3个机电振荡模式的阻尼比分别为0.108 3、0.132 5和0.108 4，均大于0.1。由此可见，按照本文所提出方法设计的PSS可以提高系统的阻尼。

1 s时刻G3机械转矩增加0.05，1.1 s时刻该小扰动故障消失，安装电力系统稳定器前后，发电机功角曲线如图3所示。

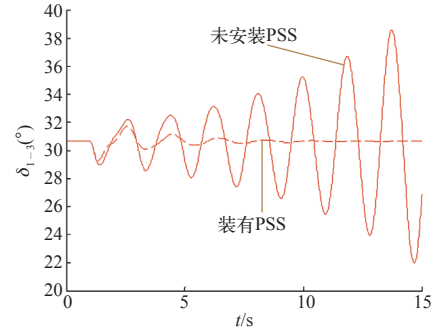
图3a中是G1与G2转子角的差随时间变化的曲线。在未安装电力系统稳定器时，该曲线在故障后是逐渐发散的，而安装电力系统稳定器后功角振荡逐渐衰减，最终趋于稳定。由此可以认为，在安装电力系统稳定器后增加了机电模式 $\bar{\lambda}_1$ 的阻尼比。同理，根据图3b、c可知，电力系统稳定器也提高了机电模式 $\bar{\lambda}_2$ 和机电模式 $\bar{\lambda}_3$ 的阻尼比。因此，验证了本文基于降阶算法的PSS分段式设计方法的有效性。



(a) G1与G2转子角之差



(b) G3与G4转子角之差



(c) G1与G3转子角之差

图3 系统仿真结果

4 结束语

文中采用的降阶模态分析法是一种利用降阶矩阵计算电力系统机电模式的方法。该方法以矩

阵 $-\omega_o \mathbf{M}^{-1} \mathbf{G}_1$ 的 $N-1$ 个非零特征根作为寻优初值,采用直接搜索法寻找令行列式 $|\text{DET}[\mathbf{H}(\lambda)]|=0$ 的 λ 作为系统的机电模式,而不是计算状态矩阵全部特征值获得机电振荡模式。因此,同QR分解法相比,降阶算法可以更加快速有效地计算大规模电力系统的机电振荡模式,更适合应用于在协调设计PSS的过程求取系统的机电振荡模式。

分段式PSS设计方法基于阻尼转矩分析理论，它将PSS的设计过程分为两个阶段：①通过最速下降法协同确定每台PSS应提供的阻尼转矩系数；②使用相位补偿法分别确定每一台PSS的增益和时间常数。分段式PSS设计方法同时具有优化整定法和相位补偿法的优点，既可以协调每台PSS共同抑制系统中多个振荡模式，解决“特征值漂移”问题，同时也具有明确的物理意义，便于理解与分析。

本文结合四机两区电力系统,给出了基于降阶算法的分段式PSS设计方法系统整定PSS参数的过程。该算例中,需要安装3台PSS共同抑制系统中存在的3个振荡模式。模态分析结果与非线性仿真曲线均可表明,按本文方法设计的电力系统稳定器可以增加系统阻尼,抑制低频振荡,进而验证了该方法的有效性。

参考文献

- 阵 $-\omega_0 \mathbf{M}^{-1} \mathbf{G}_1$ 的 $N-1$ 个非零特征根作为寻优初值, 采用直接搜索法寻找令行列式 $|\text{DET}[\mathbf{H}(\lambda)]|=0$ 的 λ 作为系统的机电模式, 而不是计算状态矩阵全部特征值获得机电振荡模式。因此, 同QR分解法相比, 降阶算法可以更加快速有效地计算大规模电力系统的机电振荡模式, 更适合应用于在协调设计PSS的过程求取系统的机电振荡模式。

分段式PSS设计方法基于阻尼转矩分析理论, 它将PSS的设计过程分为两个阶段: ①通过最速下降法协同确定每台PSS应提供的阻尼转矩系数; ②使用相位补偿法分别确定每一台PSS的增益和时间常数。分段式PSS设计方法同时具有优化整定法和相位补偿法的优点, 既可以协调每台PSS共同抑制系统中多个振荡模式, 解决“特征值漂移”问题, 同时也具有明确的物理意义, 便于理解与分析。

本文结合四机两区电力系统, 给出了基于降阶算法的分段式PSS设计方法系统整定PSS参数的过程。该算例中, 需要安装3台PSS共同抑制系统中存在的3个振荡模式。模态分析结果与非线性仿真曲线均可表明, 按本文方法设计的电力系统稳定器可以增加系统阻尼, 抑制低频振荡, 进而验证了该方法的有效性。

参考文献

 - [1] Demello F P, Concordia C. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88 (4): 316-329.
 - [2] 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 (1): 1-7.
 - [3] Gooi H B, Hill E F, Mobarak M A, et al. Coordinated multi-machine stabilizer settings without eigenvalue drift [J]. IEEE Power Engineering Review, 1981, 1 (8): 47.
 - [4] Doi A, Abe S. Coordinated synthesis of power system stabilizers in multimachine power systems [J]. IEEE Power Engineering Review, 1984, 4 (6): 60-61.
 - [5] Vournas C D, Maratos N, Papadias B C. Power system stabiliser co-ordination using a parameter optimisation method [J]. International Conference on Control, 1994, 1994 (1): 403-408.
 - [6] Abdel-Magid Y L, Abido M A. Optimal multiobjective design of robust power system stabilizers using genetic algorithms [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18 (3): 1125-1132.
 - [7] Abido M A. Robust design of multimachine power system stabilizers using simulated annealing [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2000, 15 (3): 297-304.
 - [8] Abido M A. Optimal design of power-system stabilizers using particle swarm optimization [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2002, 17 (3): 406-413.
 - [9] Yu Y N. Electric power system dynamics [M]. New York: Academic Press, 1983.
 - [10] Larsen L V, Swann D A. Applying power system stabilizers part III: practical considerations [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, 100 (6): 3034-3046.

(收稿日期: 2016-04-06) **EA**

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18 19 20 21 22 23 24 25 26 27 28 29 30 31 32 33 34 35 36 37 38 39 40 41 42 43 44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 57 58 59 60 61 62 63 64 65 66 67 68 69 70 71 72 73 74 75 76 77 78 79 80 81 82 83 84 85 86 87 88 89 90 91 92 93 94 95 96 97 98 99 100 101 102 103 104 105 106 107 108 109 110 111 112 113 114 115 116 117 118 119 120 121 122 123 124 125 126 127 128 129 130 131 132 133 134 135 136 137 138 139 140 141 142 143 144 145 146 147 148 149 150 151 152 153 154 155 156 157 158 159 160 161 162 163 164 165 166 167 168 169 170 171 172 173 174 175 176 177 178 179 180 181 182 183 184 185 186 187 188 189 190 191 192 193 194 195 196 197 198 199 200 201 202 203 204 205 206 207 208 209 210 211 212 213 214 215 216 217 218 219 220 221 222 223 224 225 226 227 228 229 230 231 232 233 234 235 236 237 238 239 240 241 242 243 244 245 246 247 248 249 250 251 252 253 254 255 256 257 258 259 260 261 262 263 264 265 266 267 268 269 270 271 272 273 274 275 276 277 278 279 280 281 282 283 284 285 286 287 288 289 290 291 292 293 294 295 296 297 298 299 300 301 302 303 304 305 306 307 308 309 310 311 312 313 314 315 316 317 318 319 320 321 322 323 324 325 326 327 328 329 330 331 332 333 334 335 336 337 338 339 340 341 342 343 344 345 346 347 348 349 350 351 352 353 354 355 356 357 358 359 360 361 362 363 364 365 366 367 368 369 370 371 372 373 374 375 376 377 378 379 380 381 382 383 384 385 386 387 388 389 390 391 392 393 394 395 396 397 398 399 400 401 402 403 404 405 406 407 408 409 410 411 412 413 414 415 416 417 418 419 420 421 422 423 424 425 426 427 428 429 430 431 432 433 434 435 436 437 438 439 440 441 442 443 444 445 446 447 448 449 450 451 452 453 454 455 456 457 458 459 460 461 462 463 464 465 466 467 468 469 470 471 472 473 474 475 476 477 478 479 480 481 482 483 484 485 486 487 488 489 490 491 492 493 494 495 496 497 498 499 500 501 502 503 504 505 506 507 508 509 510 511 512 513 514 515 516 517 518 519 520 521 522 523 524 525 526 527 528 529 530 531 532 533 534 535 536 537 538 539 540 541 542 543 544 545 546 547 548 549 550 551 552 553 554 555 556 557 558 559 560 561 562 563 564 565 566 567 568 569 570 571 572 573 574 575 576 577 578 579 580 581 582 583 584 585 586 587 588 589 590 591 592 593 594 595 596 597 598 599 600 601 602 603 604 605 606 607 608 609 610 611 612 613 614 615 616 617 618 619 620 621 622 623 624 625 626 627 628 629 630 631 632 633 634 635 636 637 638 639 640 641 642 643 644 645 646 647 648 649 650 651 652 653 654 655 656 657 658 659 660 661 662 663 664 665 666 667 668 669 670 671 672 673 674 675 676 677 678 679 680 681 682 683 684 685 686 687 688 689 690 691 692 693 694 695 696 697 698 699 700 701 702 703 704 705 706 707 708 709 710 711 712 713 714 715 716 717 718 719 720 721 722 723 724 725 726 727 728 729 730 731 732 733 734 735 736 737 738 739 740 741 742 743 744 745 746 747 748 749 750 751 752 753 754 755 756 757 758 759 760 761 762 763 764 765 766 767 768 769 770 771 772 773 774 775 776 777 778 779 780 781 782 783 784 785 786 787 788 789 790 791 792 793 794 795 796 797 798 799 800 801 802 803 804 805 806 807 808 809 810 811 812 813 814 815 816 817 818 819 820 821 822 823 824 825 826 827 828 829 830 831 832 833 834 835 836 837 838 839 840 841 842 843 844 845 846 847 848 849 850 851 852 853 854 855 856 857 858 859 860 861 862 863 864 865 866 867 868 869 870 871 872 873 874 875 876 877 878 879 880 881 882 883 884 885 886 887 888 889 890 891 892 893 894 895 896 897 898 899 900 901 902 903 904 905 906 907 908 909 910 911 912 913 914 915 916 917 918 919 920 921 922 923 924 925 926 927 928 929 930 931 932 933 934 935 936 937 938 939 940 941 942 943 944 945 946 947 948 949 950 951 952 953 954 955 956 957 958 959 960 961 962 963 964 965 966 967 968 969 970 971 972 973 974 975 976 977 978 979 980 981 982 983 984 985 986 987 988 989 990 991 992 993 994 995 996 997 998 999 1000 1001 1002 1003 1004 1005 1006 1007 1008 1009 1010 1011 1012 1013 1014 1015 1016 1017 1018 1019 1020 1021 1022 1023 1024 1025 1026 1027 1028 1029 1030 1031 1032 1033 1034 1035 1036 1037 1038 1039 104

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告