

多机系统利用模态最优线性组合法的降阶分析

刘海涛^{1,2}, 龚乐年¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096; 2. 南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 210013)

摘要: 在多机电力系统小扰动稳定分析与控制中, 利用原始系统状态空间方程的坐标变换, 根据具有附加条件的最优分析方法, 建立二次型性能指标, 以主导模态坐标近似来描述非主导模态坐标, 从而建立模态最优线性组合降阶法的等值模型, 由等值模型可以分析所有状态变量的动态变化过程。以双轴同步发电机模型为基础, 综合考虑自动励磁调节系统, 详细推导多机系统原始的状态空间方程。以一3机9节点实例建立原始状态空间方程, 采用模态最优线性组合法获得降阶后的等值模型, 由降阶前后动态特性曲线的近似重合论证了模态最优线性组合降阶法的有效性。

关键词: 模态; 最优; 降阶; 组合; 小扰动

Multi-machine system reduced-order analysis based on modal optimal linear combination method

LIU Hai-tao^{1,2}, GONG Le-nian¹

(1. College of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. College of Electrical Engineering, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 210013, China)

Abstract: In a multi-machine power system small signal stability analysis and control, the coordinate transformation of original system state space equation and optimal conditions with additional analysis are used to establish the quadratic performance index, and thus to lead dominant modal coordinates approximation to describe the non-dominant modal coordinates. Further the equivalent model is established based on the modal optimal linear combination reduction method. Using the equivalent model can analyze all the dynamic process of state variables. Based on dual-axis synchronous generator model and automatic excitation control system, the state-space equation of multi-machine system is deduced in detail. With a 3-machine 9-node example, the original state space equation is established and equivalent modal is obtained by model optimal linear combination method. The approximation coincides of dynamic characteristic curve before and after the reduced order demonstrates that the modal optimal linear combination reduction method is effective.

This work is supported by National Natural Science Foundation of Jiangsu Province(No.BK2008366).

Key words: mode; optimal; degree deduction; combination; small signal

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)15-0001-06

0 引言

大型互联电力系统的规模日益庞大, 且运行环境与方式不断变化, 面对众多的发电机组和复杂的电网所建立的小扰动稳定线性化模型维数甚高^[1-3]。因此, 在不影响系统动态本质特性的前提下将电力系统状态方程的维数适当降低, 即对模型进行降阶处理是一个值得研究的问题。降阶方法的讨论将有助于解决电力系统运行控制分析中出现的维数过高的问题, 同时也可有效地简化电力系统的分析与计算。

为降低系统阶次, 过去常用的方法是先利用物理定律建模, 然后略去一些次要因素, 以尽量减少数模即模型的阶次, 即建立所谓的简化模型^[4], 但这样做有时不能够或无法满足问题的需要。因此有必要专门研究模型的降阶处理, 尽量降低模型的阶数, 同时又可对原始模型中所有状态变量求解, 并使降阶前后的应用效果和计算精度相差不大。利用原始状态空间方程的坐标变换, 以主导模态坐标近似来描述非主导模态坐标^[5], 将降阶分析转化为求解具有附加条件的最优问题, 从而建立基于模态最优线性组合降阶法的等值模型。

1 模态最优线性组合法的基本思路

在一个控制调节系统的 n 个状态变量中, 我们

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK2008366); 江苏省“六大人才高峰”资助项目

总是可以确定出其中需重点考虑的状态变量, 由此, 可设 $\mathbf{x}_I = [x_1 \cdots x_r]^T$ 为由系统中需重点研究的 r 个状态变量构成的列矢量, 而 $\mathbf{x}_{II} = [x_{r+1} \cdots x_n]^T$ 则由剩下的 $(n-r)$ 个无须重点研究的状态变量构成的另一个列矢量。在此基础上原系统状态空间方程为 $\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$, $\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x}$ 。令 $\mathbf{V}^{-1}\mathbf{A}\mathbf{V} = \mathbf{A} = \text{diag}(\mathbf{A}_I, \mathbf{A}_{II})$, \mathbf{V} 为系统的特征(转换)矩阵, 式中的 \mathbf{A} 阵如式(1)所示。其中特征值中包含 r 个主导与 $(n-r)$ 个非主导特征值, 若假设主导特征值的编号顺次为 $1, 2, \dots, r$, 非主导特征值对应的编号则应为 $r+1, r+2, \dots, n$ 。主导特征值的选择由主导度^[5]的大小降序排序得到。

$$\mathbf{A} = \text{diag}(\mathbf{A}_I, \mathbf{A}_{II}) = \text{diag}(\lambda_1 \cdots \lambda_r, \lambda_{r+1} \cdots \lambda_n) \quad (1)$$

\mathbf{V} 阵求得后, 利用坐标变换 $\mathbf{x} = \mathbf{V}\mathbf{z}$ 可得到系统对角线规范状态空间方程:

$$\dot{\mathbf{z}} = \mathbf{A}\mathbf{z} + \hat{\mathbf{B}}\mathbf{u} \quad (2)$$

$$\mathbf{y} = \hat{\mathbf{C}}\mathbf{z} \quad (3)$$

其中: $\hat{\mathbf{B}} = \mathbf{V}^{-1}\mathbf{B}$; $\hat{\mathbf{C}} = \mathbf{C}\mathbf{V}$ 。进而可以写成:

$$\begin{bmatrix} \dot{z}_I \\ \dot{z}_{II} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_I & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_I \\ z_{II} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{B}}_I \\ \hat{\mathbf{B}}_{II} \end{bmatrix} \mathbf{u} \quad (4)$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{C}}_I & \hat{\mathbf{C}}_{II} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} z_I \\ z_{II} \end{bmatrix} \quad (5)$$

考虑用主导模态坐标 \mathbf{z}_I 来描述非主导模态坐标之近似值 $\tilde{\mathbf{z}}_{II}$, 即用式(6)来表示其之间的关系:

$$\tilde{\mathbf{z}}_{II} = \mathbf{E}\mathbf{z}_I \quad (6)$$

为确保系统降阶后 \mathbf{z}_{II} 的稳态精度, 应要求 $\tilde{\mathbf{z}}_{II}(\infty) = \mathbf{E}\mathbf{z}_I(\infty) = \mathbf{z}_{II}(\infty)$, 式中 \mathbf{E} 阵之各元素为定值实数或复数, $\mathbf{z}_{II}(t)$ 误差表示形式如式(7)所示:

$$\Delta \mathbf{z}_{II}(t) = \mathbf{z}_{II}(t) - \tilde{\mathbf{z}}_{II}(t) = \mathbf{z}_{II}(t) - \mathbf{E}\mathbf{z}_I(t) = \boldsymbol{\xi}(t) + \boldsymbol{\eta} \quad (7)$$

确定二次型性能指标(目标函数) $J = J_1 + J_2$ 。

其中, J 为标量实数, J_1 将只含 $\boldsymbol{\xi}(t)$ 的影响, 而 J_2 则只考虑 $\boldsymbol{\eta}$ (内含 \mathbf{E} 阵) 的影响。当要求 $J \rightarrow \min$ 时, 这将是一个求解具有附加条件的最优问题, 其中考虑 $\boldsymbol{\eta}$ 的影响可视为附加条件^[5], 求解 \mathbf{E} 阵使 $\Delta \mathbf{z}_{II}(\infty) \rightarrow 0$ 。 \mathbf{E} 阵求解之后, \mathbf{V} 阵改写为

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{11} & \mathbf{V}_{12} \\ \mathbf{V}_{21} & \mathbf{V}_{22} \end{bmatrix}, \text{ 则由 } \dot{\mathbf{x}}_I = \mathbf{V}_{11}\dot{\mathbf{z}}_I + \mathbf{V}_{12}\dot{\mathbf{z}}_{II} \text{ 可得}$$

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_I = \mathbf{V}_{11}\dot{\mathbf{z}}_I + \mathbf{V}_{12}\dot{\tilde{\mathbf{z}}}_{II} = \mathbf{V}_{11}\dot{\mathbf{z}}_I + \mathbf{V}_{12}\mathbf{E}\dot{\mathbf{z}}_I = \mathbf{M}\dot{\mathbf{z}}_I \quad (8)$$

或者

$$\dot{\mathbf{z}}_I = \mathbf{M}^{-1}\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_I \quad (9)$$

式中, $\mathbf{M} = (\mathbf{V}_{11} + \mathbf{V}_{12}\mathbf{E})$ 。由式(4)、式(8)和式(9)系统状态方程可以写成:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_I = \mathbf{M}\dot{\mathbf{z}}_I = \mathbf{M}(\mathbf{A}_I\mathbf{z}_I + \hat{\mathbf{B}}_I\mathbf{u}) = \mathbf{M}(\mathbf{A}_I\mathbf{M}^{-1}\tilde{\mathbf{x}}_I + \hat{\mathbf{B}}_I\mathbf{u}) \quad (10)$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_{II} = \mathbf{V}_{21}\mathbf{z}_I + \mathbf{V}_{22}\tilde{\mathbf{z}}_{II} = (\mathbf{V}_{21} + \mathbf{V}_{22}\mathbf{E})\mathbf{M}^{-1}\tilde{\mathbf{x}}_I \quad (11)$$

这时系统将由 n 阶降为 r 阶。由式(10)解得 $\tilde{\mathbf{x}}_I$ 后, 代入式(11)即可确定 $\tilde{\mathbf{x}}_{II}$ 。

2 多机电力系统降阶前模型的建立

在目前广泛使用的同步发电机数学模型中, 等值阻尼绕组的个数最多为三个。对于凸极机, 一般在转子的直轴和交轴上各采用一个等值阻尼绕组, 分别为 D 绕组和 Q 绕组; 而对于隐极机, 在交轴再增加一个等值阻尼绕组, 一般记为 H 绕组, 该绕组反应穿入转子较深的涡流效应。若仅考虑 H 绕组的影响, 则称为双轴模型^[6-8]。同步发电机的线性化方程为:

$$\Delta \dot{\delta} = \omega_s \Delta \omega \quad (12)$$

$$\Delta \dot{\omega} = \frac{1}{T_J} \{ \Delta P_m - D \Delta \omega - I_{q(0)} \Delta E'_q - I_{d(0)} \Delta E'_d - [E_{d(0)} - (X'_d - X'_q) I_{q(0)}] \Delta \omega_d - [E_{q(0)} - (X'_q - X'_d) I_{d(0)}] \Delta \omega_q \} \quad (13)$$

$$\Delta \dot{E}'_q = \frac{1}{T'_{d0}} [\Delta E_f - \Delta E'_q - (X'_d - X'_q) \Delta I_d] \quad (14)$$

$$\Delta \dot{E}'_d = \frac{1}{T'_{q0}} [-\Delta E'_d + (X'_q - X'_d) \Delta I_q] \quad (15)$$

$$\Delta U_{di} = \Delta E'_{di} + X'_{qi} \Delta I_{qi} - R_{ai} \Delta I_{di} \quad (16)$$

$$\Delta U_{qi} = \Delta E'_{qi} - X'_{di} \Delta I_{di} - R_{ai} \Delta I_{qi} \quad (17)$$

其中: $\Delta \delta$ 为发电机功角偏差量(下同); $\Delta \omega$ 为发电机转速; $\Delta E'_q$ 与 $\Delta E'_d$ 为发电机 q 轴和 d 轴暂态电势^[9]。

综合考虑同步发电机组自动励磁调节系统的通用三阶模型, 各台发电机组的状态变量均为

$$\Delta \mathbf{x}_i = [\Delta \delta_i, \Delta \omega_i, \Delta E'_{qi}, \Delta E'_{di}, \Delta E_f, \Delta U_{Ai}, \Delta U_{Fi}]^T$$

($i = 1 \sim N$, N 为发电机组的个数), ΔE_f 为励磁电压, ΔU_A 与 ΔU_F 为励磁系统中间状态变量^[10-13]。

考虑以发电机组励磁系统的给定参考电压 ΔU_{refi} 为输入量 u_i (应该指出此时降阶处理及其效果是所分析问题的重点, 故而这种处理方法是可行的), 多机系统中可以根据实际情况选择设置的地点和个数,

各台发电机组线性化的微分方程和定子电压线性化方程写成如下形式:

$$\frac{d\Delta \mathbf{x}_i}{dt} = \bar{\mathbf{A}}_i \Delta \mathbf{x}_i + \bar{\mathbf{B}}_{U_i} \Delta \mathbf{I}_{dq_i} + \bar{\mathbf{B}}_{U_i} \Delta \mathbf{U}_{dq_i} + \mathbf{b}_i u_i \quad (18)$$

$$\Delta \mathbf{U}_{dq_i} = \bar{\mathbf{P}}_i \Delta \mathbf{x}_i + \bar{\mathbf{Z}}_i \Delta \mathbf{I}_{dq_i} \quad (19)$$

式中: $\Delta \mathbf{U}_{dq_i} = [\Delta U_{di} \ \Delta U_{qi}]^T$; $\Delta \mathbf{I}_{dq_i} = [\Delta I_{di} \ \Delta I_{qi}]^T$; 且 $\bar{\mathbf{A}}_i$ 、 $\bar{\mathbf{B}}_{U_i}$ 、 $\bar{\mathbf{B}}_{U_i}$ 、 $\bar{\mathbf{P}}_i$ 、 $\bar{\mathbf{Z}}_i$ 、 \mathbf{b}_i 为对应的系数阵。

由于 $\Delta \mathbf{U}_{dq_i}$ 和 $\Delta \mathbf{I}_{dq_i}$ 为各发电机 d 轴和 q 轴分量, 而电力网络方程建立于同步旋转坐标 $x-y$ 参考轴, 需要将 $\Delta \mathbf{U}_{dq_i}$ 和 $\Delta \mathbf{I}_{dq_i}$ 转换成同步旋转坐标

$$x-y \text{ 参考轴分量 } \Delta \mathbf{U}_i = \begin{bmatrix} \Delta U_{xi} \\ \Delta U_{yi} \end{bmatrix}, \quad \Delta \mathbf{I}_i = \begin{bmatrix} \Delta I_{xi} \\ \Delta I_{yi} \end{bmatrix},$$

用 $\Delta \mathbf{U}_i$ 和 $\Delta \mathbf{I}_i$ 代入微分方程中消去 $\Delta \mathbf{U}_{dq_i}$ 和 $\Delta \mathbf{I}_{dq_i}$ [7], 得到同步旋转坐标 $x-y$ 参考轴下的发电机组微分方程和定子电压方程:

$$\frac{d\Delta \mathbf{x}_i}{dt} = \mathbf{A}_i \Delta \mathbf{x}_i + \mathbf{B}_i \Delta \mathbf{U}_i + \mathbf{b}_i u_i \quad (20)$$

$$\Delta \mathbf{I}_i = \mathbf{D}_i \Delta \mathbf{U}_i + \mathbf{C}_i \Delta \mathbf{x}_i \quad (21)$$

式中: $\mathbf{A}_i = \bar{\mathbf{A}}_i + \bar{\mathbf{B}}_{U_i} \bar{\mathbf{Z}}_i^{-1} (\mathbf{R}_{U_i} - \bar{\mathbf{P}}_i) + \bar{\mathbf{B}}_{U_i} \mathbf{R}_{U_i}$;

$$\mathbf{R}_{U_i} = \begin{bmatrix} U_{qi(0)} & 0 & \cdots & 0 \\ -U_{di(0)} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_{I_i} = \begin{bmatrix} I_{qi(0)} & 0 & \cdots & 0 \\ -I_{di(0)} & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}_i = (\bar{\mathbf{B}}_{U_i} \bar{\mathbf{Z}}_i^{-1} + \bar{\mathbf{B}}_{U_i}) \mathbf{T}_{i(0)}; \quad \mathbf{T}_{i(0)} = \begin{bmatrix} \sin \delta_{i(0)} & -\cos \delta_{i(0)} \\ \cos \delta_{i(0)} & \sin \delta_{i(0)} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C}_i = \mathbf{T}_{i(0)}^T [\bar{\mathbf{Z}}_i^{-1} (\mathbf{R}_{U_i} - \bar{\mathbf{P}}_i) - \mathbf{R}_{U_i}], \quad \mathbf{D}_i = \mathbf{T}_{i(0)}^T \bar{\mathbf{Z}}_i^{-1} \mathbf{T}_{i(0)} [7].$$

在小干扰稳定分析中, 负荷大都采用电压静态特性模型, 网络方程直接以同步旋转坐标 $x-y$ 参考轴下的节点注入电流偏差与节点电压偏差之间的代数方程表示, 消去所有负荷节点的电流偏差后, 网络方程写成如下分块矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{I}_G \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{GG} & \mathbf{Y}_{GL} \\ \mathbf{Y}_{LG} & \mathbf{Y}_{LL} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{U}_G \\ \Delta \mathbf{U}_L \end{bmatrix} \quad (22)$$

综合上述各台发电机组的微分方程和网络的代数方程, 可以组成全部发电机组的方程式:

$$\frac{d\Delta \mathbf{x}_G}{dt} = \mathbf{A}_G \Delta \mathbf{x}_G + \mathbf{B}_G \Delta \mathbf{U}_G + \mathbf{B} u \quad (23)$$

$$\Delta \mathbf{I}_G = \mathbf{D}_G \Delta \mathbf{U}_G + \mathbf{C}_G \Delta \mathbf{x}_G \quad (24)$$

式中:

$$\Delta \mathbf{x}_G = [\Delta \mathbf{x}_1^T \ \Delta \mathbf{x}_2^T \ \cdots \ \Delta \mathbf{x}_N^T]^T; \quad \Delta \mathbf{I}_G = [\Delta \mathbf{I}_1 \ \Delta \mathbf{I}_2 \ \cdots]^T;$$

$$\Delta \mathbf{U}_G = [\Delta \mathbf{U}_1 \ \Delta \mathbf{U}_2 \ \cdots]^T; \quad \mathbf{A}_G = \text{diag}[\mathbf{A}_1 \ \mathbf{A}_2 \ \cdots \ \mathbf{A}_N];$$

$$\mathbf{B}_G = \text{diag}[\mathbf{B}_1 \ \mathbf{B}_2 \ \cdots \ \mathbf{B}_N]; \quad \mathbf{C}_G = \text{diag}[\mathbf{C}_1 \ \mathbf{C}_2 \ \cdots \ \mathbf{C}_N];$$

$$\mathbf{D}_G = \text{diag}[\mathbf{D}_1 \ \mathbf{D}_2 \ \cdots \ \mathbf{D}_N]; \quad \mathbf{B} = \text{diag}[\mathbf{b}_1 \ \mathbf{b}_2 \ \cdots \ \mathbf{b}_N];$$

$$u = [\Delta U_{\text{ref}1} \ \Delta U_{\text{ref}2} \ \cdots \ \Delta U_{\text{ref}N}]^T.$$

将式 22 代入式 23, 进一步消去运行向量 $\Delta \mathbf{U}_G$, 并以发电机机端电流为输出量, 即可得到状态空间方程:

$$\Delta \dot{\mathbf{x}}_G = \mathbf{A} \Delta \mathbf{x}_G + \mathbf{B} u \quad (25)$$

$$y = \Delta \mathbf{I}_G =$$

$$\mathbf{C}_G (\mathbf{Y}_{GG} + \mathbf{Y}_{GL} \mathbf{Y}_{LG}^{-1} (\mathbf{Y}_{GG} + \mathbf{Y}_{GL} \mathbf{Y}_{LG}^{-1} \mathbf{D}_G)^{-1} \Delta \mathbf{x}_G = \quad (26)$$

$$\mathbf{C} \Delta \mathbf{x}_G$$

其中, $\mathbf{A} = \mathbf{A}_G + \mathbf{B}_G [\mathbf{Y}_{GG} - \mathbf{D}_G - \mathbf{Y}_{GL} \mathbf{Y}_{LG}^{-1} \mathbf{Y}_{LG}]^{-1} \mathbf{C}_G$ 。

3 利用模态最优线性组合法的多机实例降阶分析

3.1 利用模态最优线性组合法的降阶实现

以参考文献[7]中三机 9 节点电力系统为例, 如图 1, 该系统有 3 台发电机、3 个负荷以及 9 条支路, 支路数据和发电机参数见参考文献[7], 正常运行时对应于工作点负荷状况的系统潮流如表 1 所示。发电机 1 采用经典模型, 发电机 2 和发电机 3 采用双轴模型, 发电机 2 和发电机 3 均装有自动励磁调节系统。

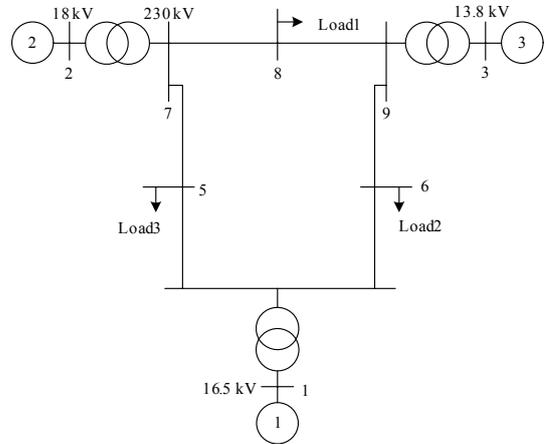


图 1 多机系统实例接线图

Fig.1 Wiring diagram of multi-machine example

此三机系统的输入量、状态变量、输出量分别为 $u = [\Delta U_{\text{ref}2} \ \Delta U_{\text{ref}3}]$, $x = [\Delta \delta_1 \ \Delta \omega_1 \ \Delta \delta_2 \ \Delta \omega_2 \ \Delta E'_{q2} \ \Delta E'_{d2} \ \Delta E'_{f2} \ \Delta U_{A2} \ \Delta U_{F2} \ \Delta \delta_3 \ \Delta \omega_3 \ \Delta E'_{q3} \ \Delta E'_{d3} \ \Delta E'_{f3} \ \Delta U_{A3} \ \Delta U_{F3}]^T$, $y = [\Delta I_{x1} \ \Delta I_{y1} \ \Delta I_{x2} \ \Delta I_{y2} \ \Delta I_{x3} \ \Delta I_{y3}]^T$ 。其中 $\Delta E'_{q2}$ 、 $\Delta E'_{d2}$ 、 $\Delta E'_{q3}$ 、 $\Delta E'_{d3}$ 为发电机 2 和发电机 3 采用双轴模型时(即 q 轴上考虑一个阻尼绕组 H , 忽略 D 、 Q 绕组) d 和 q 轴暂态电势。

表 1 多机系统正常运行的潮流
Tab.1 Normal power flow of multi-machine example

母线名	电压		发电机/p.u		负荷功率/ p.u
	幅值/ p.u	相角/ (°)	有功功率	无功功率	
	1	1.04	0.00	0.39	
2	1.025	10.70	1.63	0.04	Load2: 0.5+j0.1
3	1.025	6.60	0.85	-0.19	Load3: 1.25+j0.5

表 2 多机实例特征值及其对应的主导度

Tab.2 Dominant eigenvalue and its corresponding degree of the multi-machine example

序号	特征值	主导度	排序	四阶模型	三阶模型
1	-0.51413 + j11.796	0.0017031	13	非主导特征值	非主导特征值
2	-0.51413 - j11.796	0.0017031	14	非主导特征值	非主导特征值
3	-0.21193 + j7.9261	0.0074859	11	非主导特征值	非主导特征值
4	-0.21193 - j7.9261	0.0074859	12	非主导特征值	非主导特征值
5	-9.6726	0.00086785	16	非主导特征值	非主导特征值
6	-9.6726	0.0010835	15	非主导特征值	非主导特征值
7	-5.5158	0.087385	10	非主导特征值	非主导特征值
8	-3.7682	0.11921	9	非主导特征值	非主导特征值
9	-2.6228	2.1548	7	非主导特征值	非主导特征值
10	-2.5502	0.93026	8	非主导特征值	非主导特征值
11	-0.06556 + j1.0913	36.983	4	主导特征值	非主导特征值
12	-0.06556 - j1.0913	36.983	5	非主导特征值	非主导特征值
13	-0.77065	25.479	6	非主导特征值	非主导特征值
14	-0.41551 + j0.11894	363.55	1	主导特征值	主导特征值
15	-0.41551 - j0.11894	363.55	2	主导特征值	主导特征值
16	-0.26147	205.47	3	主导特征值	主导特征值

根据主导度的排序结果,考虑到 λ_{14} 、 λ_{15} 、 λ_{16} 、 λ_{11} 四个特征值对应的主导度较大,选择其为四阶等值模型的主导特征值,选择 λ_{14} 、 λ_{15} 、 λ_{16} 为三阶等值模型的主导特征值。另在多机电力系统中研究小扰动稳定问题时,每台发电机的功角变化量是需要重点研究的状态变量,故选择 $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$ 、 $\Delta\delta_3$ 、 $\Delta\omega_1$ 为四阶降阶系统中的重要状态变量, $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$ 、 $\Delta\delta_3$ 为三阶降阶系统中的重要状态变量。

由原系统的模型经过坐标变换,最终可由式(10)求解对应的二阶、三阶和四阶模型

根据第三节的详细分析以及式 25 和式 26 可以写出此三机系统在原始工作点的状态方程为 $\dot{x} = Ax + Bu, y = Cx$ 。通过计算得到此多机系统在原始工作点的特征值以及对应的主导度,并按照主导度的大小排序,所得结果列于表 2。

$\dot{\tilde{x}}_I = \tilde{A}\tilde{x}_I + \tilde{B}u$, 考虑发电机 1 和发电机 2 励磁系统的给定电压参考值偏差均为 0.05, 在 \tilde{x}_I 求得后, 可进一步由式 (11) 确定 \tilde{x}_{II} 。以多机实例中状态变量 $\Delta\delta_1$ 、 $\Delta\delta_2$ 、 $\Delta\delta_3$ 、 $\Delta E'_{q2}$ 、 $\Delta E'_{q3}$ 、 $\Delta E'_{f3}$ 降阶前后的动态特性曲线直观反映模型等值的效果。图 2~图 8 画出此多机系统工作点 1 对应的四阶、三阶和降阶前原始模型中重要状态变量对应的动态特性曲线。

注: 此多机实例利用最优线性组合法降阶后, 所有状态变量降阶前后的动态特性曲线均具备良好的等值效果。受篇幅所限, 仅画出部分状态变量的动态特性曲线。

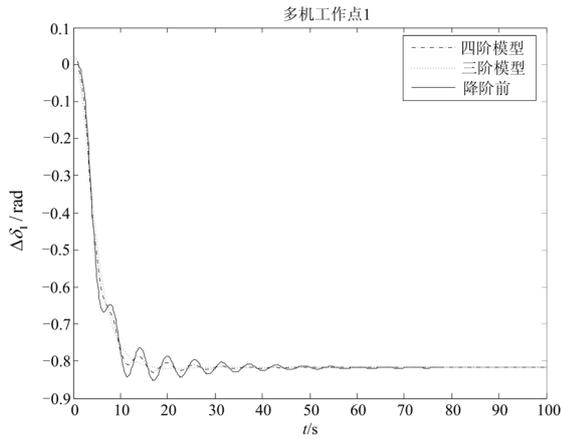


图 2 状态变量 $\Delta\delta_1$ 降阶前后动态特性曲线图

Fig.2 Dynamic characteristic curves before and after order reduction of $\Delta\delta_1$

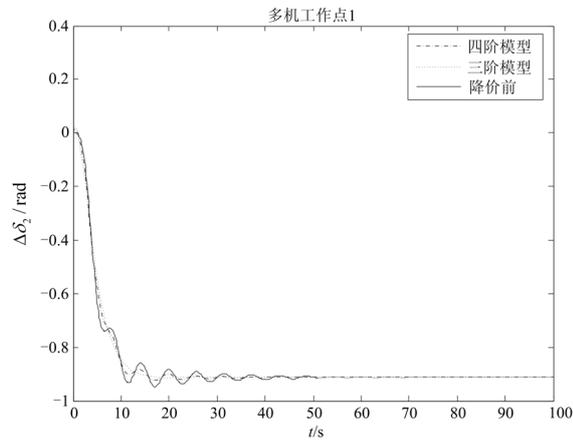


图 3 状态变量 $\Delta\delta_2$ 降阶前后动态特性曲线

Fig.3 Dynamic characteristic curves before and after order reduction of $\Delta\delta_2$

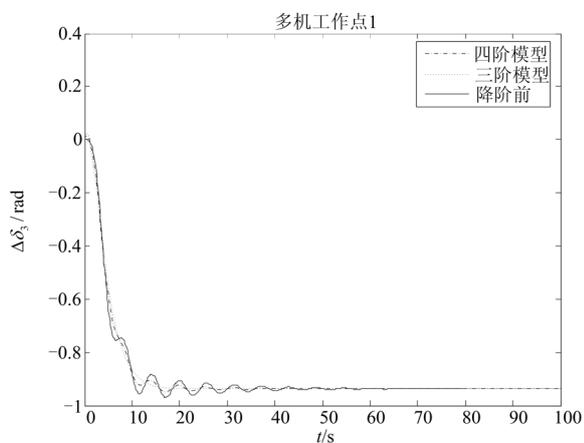


图 4 状态变量 $\Delta\delta_3$ 降阶前后动态特性曲线

Fig.4 Dynamic characteristic curves before and after order reduction of $\Delta\delta_3$

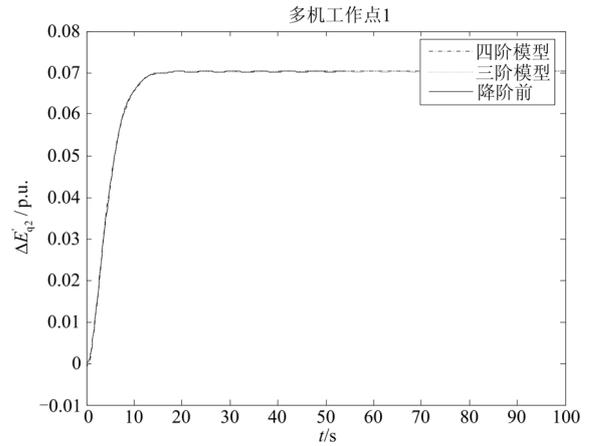


图 5 状态变量 $\Delta E'_{q_2}$ 降阶前后动态特性曲线

Fig.5 Dynamic characteristic curves before and after order reduction of $\Delta E'_{q_2}$

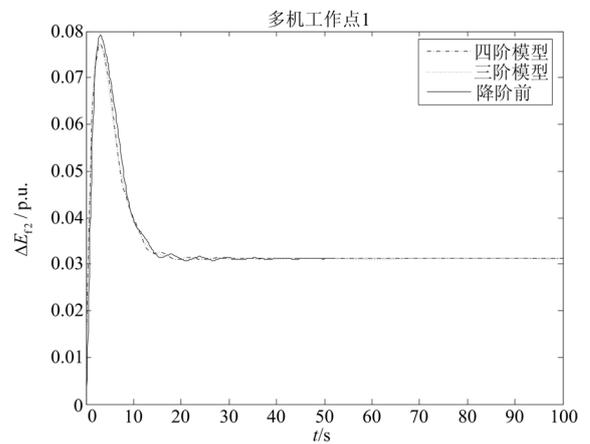


图 6 状态变量 $\Delta E'_{12}$ 降阶前后动态特性曲线

Fig.6 Dynamic characteristic curves before and after order reduction of $\Delta E'_{12}$

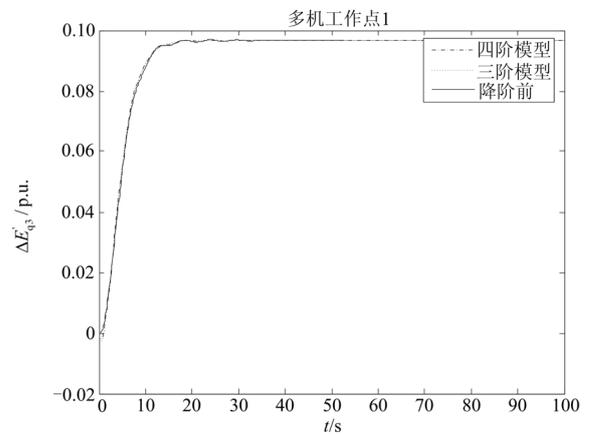


图 7 状态变量 $\Delta E'_{q_3}$ 降阶前后动态特性曲线

Fig.7 Dynamic characteristic curves before and after order reduction of $\Delta E'_{q_3}$

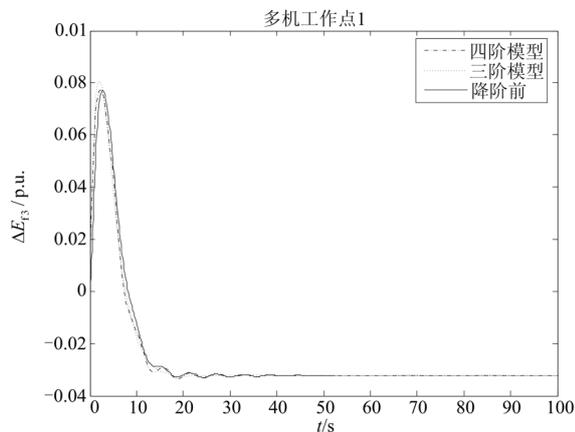


图8 状态变量 ΔE_{f3} 降阶前后动态特性曲线

Fig.8 Dynamic characteristic curves before and after order reduction of ΔE_{f3}

3.2 利用模态最优线性组合法降阶的效果分析

从图 2~8 中可以发现, 此三机系统在原始工作点降为四阶模型时, 重要状态变量降阶前后的曲线完全重合, 非重要状态变量 $\Delta E'_{q2}$ 、 ΔE_{f2} 、 $\Delta E'_{q3}$ 、 ΔE_{f3} 也具有良好的等值效果; 降为三阶等值模型时, $\Delta \delta_1$ 、 $\Delta \delta_2$ 、 $\Delta \delta_3$ 降阶前后的曲线略有误差, $\Delta E'_{q2}$ 、 $\Delta E'_{q3}$ 降阶前后的曲线仍旧完全重合, ΔE_{f2} 、 ΔE_{f3} 在动态特性曲线的初始阶段略有误差, 且仍旧满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} [\tilde{\mathbf{x}}_{II}(t) - \mathbf{x}_{II}(t)] = 0$ 。其余状态变量的动态特性曲线与所画出的曲线具有相似的分析结果, 即三阶等值模型相比于四阶模型降阶效果略有下降, 但是仍具有良好的降阶效果。这是由于在三阶模型中选取了 λ_{14} 、 λ_{15} 、 λ_{16} 为保留特征值, 这三个特征值对应的主导度相对于 λ_{11} 要大得多, 故而四阶和三阶等值模型的降阶效果极为接近。

4 结论

模态最优线性组合降阶法根据具有附加条件的最优分析方法, 建立二次型性能指标, 合理求解矩阵 \mathbf{E} , 得到降阶模型的一般形式 $\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_1 = \mathbf{M}(\mathbf{A}_1 \tilde{\mathbf{x}}_1 + \hat{\mathbf{B}}_1 \mathbf{u})$, $\tilde{\mathbf{x}}_{II} = (\mathbf{V}_{21} + \mathbf{V}_{22} \mathbf{E}) \mathbf{M}^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_1$, 由降阶模型可以分析所有状态变量的动态变化过程。

以多机电力系统为实例, 由 16 阶原始模型降阶为四阶和三阶模型, 分析表明合理选择重要状态变量和主导特征值可以利用模态最优线性组合降阶法进行有效的降阶处理, 同时也具有较高的稳定精度, 重要状态变量的降阶精度较高, 而较少数的非重要状态变量的降阶精度在动态变化的初期略有下降。降阶的阶次也将影响到降阶的效果。

在实际应用模态最优线性组合法降阶时, 可以根据精度要求通过比较分析主导度选择最佳的降阶阶数。应该指出的是, 计算 \mathbf{E} 时要求存在 \mathbf{B}_{11} 、 \mathbf{M}

和 $\hat{\mathbf{B}}_1^T \mathbf{B}_{11}^{-1} \hat{\mathbf{B}}_1$ 的逆阵, 若某行或某列数据接近于零时, 会使精度下降; 另外最优线性组合降阶法分析中虽可得到最优解, 但不意味着由此对应的 J_i 在数值上一定是最小值, 然而这种分析方法可使降阶处理的计算量减少, 并获得较好的近似精度。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 卢强, 孙元章. 电力系统非线性控制[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [3] IEEE/CIGRE Joint task force on stability terms and definitions. definition and classification of power system stability[R]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1387-1401.
- [4] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [5] 龚乐年. 现代调节技术导论——基础理论与分析方法[M]. 南京: 东南大学出版社, 2003: 292-324.
- [6] 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.
- [7] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.
- [8] 马大强. 电力系统机电暂态过程[M]. 北京: 水利电力出版社, 1988: 14-55.
- [9] 陈珩. 同步电机运行基本理论与计算机算法[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992: 201, 274-276.
- [10] 刘取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007: 111-161.
- [11] 邓集祥, 张芳. 电力系统在一种极限运行状态下的稳定性分析[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(24): 18-21. DENG Ji-xiang, ZHANG Fang. Stability analysis of power system operating at limit state[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(24): 18-21.
- [12] Chiang H D, Chu C C, Cauley G. Direct stability analysis of electric power systems using energy functions: theory, applications, and perspective[J]. Proceedings of the IEEE, 83(11): 1497-1529.
- [13] 夏道止. 电力系统分析(下册)[M]. 北京: 水利电力出版社, 1995.

以提高电力系统的稳定性。

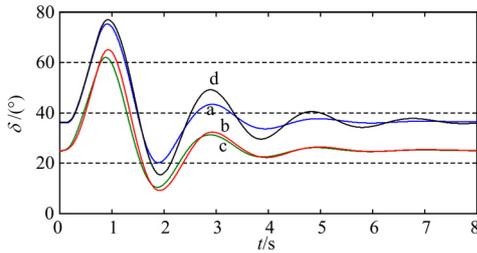


图9 多时滞转子角差
Fig.9 Rotor angles for multiple time delays

图 10 说明在另一种运行情况下, WADC 仍可以保持其良好特性。故障前有功负荷为原来的 50%, 图中曲线 b 是时滞为 0.2 s, 有 WADC 的摇摆曲线。曲线 a 是没有 WADC 的摇摆曲线。图 10 表明在运行点变化较大的情况下, WADC 仍可以有效地改善电力系统阻尼。

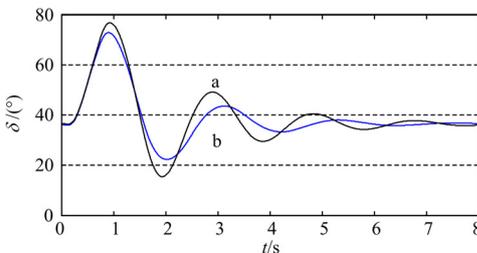


图 10 另一运行点转子角差
Fig.10 Rotor angles for another operator condition

4 总结

本文用实例说明超前-滞后补偿可以有效补偿广域信号中较大的时滞。用细菌群体趋药性优化算法求出广域阻尼控制器增益, 使其在平抑互联大电网低频振荡方面效果明显。

参考文献

[1] WU Hong-xia, HUI Ni, Heydt G T. The impact of time delay on robust control design in power systems[C]// Power Engineering Society Winter Meeting. 2002:1511-1516.
[2] 蔡超豪, 赵敏, 郝福忠. 计及时滞影响的电力系统稳定器的 H^∞ 控制[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(24): 19-23.
CAI Chao-hao, ZHAO Min, HAO Fu-zhong. H^∞ control of PSS in consideration of time-delay[J]. Power

System Protection and Control, 2008, 36(24): 19-23.
[3] Zabaïou T, Okou F A, Dessaint L A, et al. Time-delay compensation of a wide-area measurements-based hierarchical voltage and speed regulator[C]//Can J Elect Comput. 2008: 77-85.
[4] ZHANG Jian-yun, SUN Yuan-zhang. Effect of delayed input on oscillation damping using wide area power system stabilizer[C]//Transmission and Distribution Conference and Exhibition, IEEE/PES. Asia and Pacific: 2005: 1-4.
[5] He J, Lu C, Wu X, Li P, et al. Design and experiment of wide area HVDC supplementary damping controller considering time delay in China Southern power grid[J]. IEEE Proc Generation, Transmission & Distribution, 2009, 3: 17-25.
[6] Wu H, Wang Q, Li X. PMU-based wide area damping control of power systems[C]. //International Conference on Power System Technology, PowerCon. New Delhi(India): 2008.
[7] Moursi M E, Joos G, Abbey C. A secondary voltage control strategy for transmission level interconnection of wind generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2008, 23: 1178-1190.
[8] Wu H, Wu D, Wang Q, et al. Switched-control based Wide-area damping control of power systems[C]. //The First International Conference on Sustainable Power Generation and Supply, SUPERGEN. Nanjing(China): 2009.
[9] 赵义术, 李磊, 王大鹏. 基于细菌群体趋药性算法的电力系统无功优化[J]. 继电器, 2007, 35(16): 50-54.
ZHAO Yi-shu, LI Lei, WANG Da-peng. Power system reactive power optimization based on the bacterial colony chemotaxis[J]. Relay, 2007, 35(16): 50-54.
[10] Kundur P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.

收稿日期: 2009-09-10; 修回日期: 2009-11-08

作者简介:

卢昱(1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: automanlm@163.com

吴华仁(1956-), 男, 博士, 副教授, IEEE/NFPA 电弧短路联合研究工程技术咨询委员会委员, 研究方向为电弧短路, 电力系统分析与控制;

李晓慧(1960-), 女, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制。

(上接第 6 页 continued from page 6)

收稿日期: 2010-03-15; 修回日期: 2010-06-21

作者简介:

刘海涛(1972-), 女, 副教授, 博士研究生, 从事电力

系统自动化及控制方面的教学、研究工作; E-mail: sealy232@sohu.com

龚乐年(1941-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统运行与控制、大型发电机组轴系扭振、自控理论与电力市场方面的教学与科研工作。