

基于模态摄动法的电力系统 动态模型降阶分析

刘海涛^{1,2}, 龚乐年¹, 徐波²

(1.东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096;

2.南京工程学院 电力系, 江苏 南京 210013)

摘要:对具有多台发电机和复杂电力网的电力系统进行运行分析与控制中,当考虑系统非线性的暂态过程时,常常面临高阶数学模型,给系统的分析和计算带来困难。模态摄动降阶法通过合理选择重要状态变量及相应的主导特征值,可以成功地将高阶电力系统降阶。从理论上推导了逐次降阶方程,并以简单电力系统模型应用模态摄动法为例,从建模、降阶实现、效果分析验证了模态摄动法可获得较好的降阶效果。

关键词:模态摄动法; 电力系统; 降阶

中图分类号: TM 131.2

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)09-0033-03

0 引言

在电力系统的运行分析与控制中,面对多台发电机和复杂的电力网往往要考虑负荷中感应电动机的暂态过程方程,这样所建立的数学模型必然是高阶的状态方程^[1,2]。随着发电机组数和负荷节点数的增加,状态方程的阶次 n 也越高,系统分析与计算的工作量也就越大,有时甚至无法求解。为降低系统阶次,以往常用的方法是先利用物理定律建模,然后舍弃一些次要因素,以尽量减少数模即模型的阶次^[3,4]。但这样做有时不能够或无法满足问题分析的需要。因此有必要研究模型的降阶处理,以期在线性化的函数关系基础上,进一步降低模型的阶数,同时要求降阶前后模型的应用效果和计算精度相差不大。降阶方法将有助于解决电力系统运行控制分析与研究中出现的维数过高的问题,同时也可在一定程度上简化电力系统的分析与计算。

1 模态摄动降阶法的推导及分析

对于 $\dot{x}=Ax+Bu, y=Cx$ 的控制调节系统,总是可以确定出其中需要重点考虑的状态变量,即重要的状态变量,如系统被调量,另外还可考虑无需花费太大的工作量就可进行测量且其又可用于反馈的状态变量^[5]。对整个系统至关重要、必须连续观察其动态变化过程的状态变量,必须防止系统进入或处于危险的临界运行状态。确定系统中需重点研究的状态变量(假设为 r 个)以及对应的非重要状态变量($n-r$ 个)之后,就可计算与 n 个特征值相对应的主导度^[6],按其数值大小降阶排序,并分别确定 r 个主导特征值

与 $(n-r)$ 个非主导特征值。若假设主导特征值在降阶排序中的编号顺次为 $1, 2, \dots, r$, 非主导特征值对应的编号则应为 $r+1, r+2, \dots, n$ 。由此,可以令:

$$\Lambda = \text{diag}(\Lambda_I, \Lambda_{II}) = \text{diag}(\lambda_1, \dots, \lambda_r, \lambda_{r+1}, \dots, \lambda_n) \quad (1)$$

另外,可增加或减少重要状态变量个数使其个数和主导特征值的个数一致。由此,可设 $x_I = [x_1, \dots, x_r]^T$ 为由系统中需重点研究的 r 个状态变量构成的列矢量,而 $x_{II} = [x_{r+1}, \dots, x_n]^T$ 则为剩下的 $(n-r)$ 个状态变量构成另 1 个列矢量。原系统状态空间方程就可改写为

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_I \\ \dot{x}_{II} \end{bmatrix} = Ax + Bu = A \begin{bmatrix} x_I \\ x_{II} \end{bmatrix} + Bu \quad (2)$$

$$y = Cx = C \begin{bmatrix} x_I \\ x_{II} \end{bmatrix} \quad (3)$$

令 $x = Vz$, 将上述方程经过状态变量转换求得新状态空间方程:

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

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

由于 Λ_{II} 中的 $(n-r)$ 个特征值为非主导特征值,一般来说,因其对应的主导度较小,对系统的动态特性影响较小。因此,可利用摄动降阶原理,近似认为 $\dot{z}_{II}$ 的变化率可忽略(式中标波浪线表示对应的近似值),即可令:

$$\dot{z}_{II} = \Lambda_{II} \tilde{z}_{II} + \hat{B}_{II} u = 0 \rightarrow \tilde{z}_{II} = -\Lambda_{II}^{-1} \hat{B}_{II} u \quad (6)$$

对于特征矩阵 V , 可设 $V = \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} \\ V_{21} & V_{22} \end{bmatrix}$, 即可得:

$$\dot{x}_I = V_{11} \Lambda_I V_{11}^{-1} (x_I - V_{12} z_{II}) + V_{12} \Lambda_{II} z_{II} + (V_{11} \hat{B}_I + V_{12} \hat{B}_{II}) u \quad (7)$$

在式(7)中,如果用 $\mathbf{z}_{\parallel}$ 对应的近似值代替,那么得到的 $\dot{\mathbf{x}}_1$ 与 $\mathbf{x}_1$ 亦为近似值,并分别用 $\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_1$ 和 $\tilde{\mathbf{x}}_1$ 表示:

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_1 = \mathbf{V}_{11} \mathbf{A}_1 \mathbf{V}_{11}^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_1 + \mathbf{V}_{11} (\hat{\mathbf{B}}_1 + \mathbf{A}_1 \mathbf{V}_{11}^{-1} \mathbf{V}_{12} \mathbf{A}_{\parallel}^{-1} \hat{\mathbf{B}}_{\parallel}) \mathbf{u} \quad (8)$$

式(8)可写为

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_1 = \tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{x}}_1 + \tilde{\mathbf{B}} \mathbf{u}$$

由此可确定 $\tilde{\mathbf{A}}, \tilde{\mathbf{B}}$ 阵(仍为常系数阵)。原 n 阶状态方程就将降阶为 r 阶系统。

在 $\tilde{\mathbf{x}}_1$ 确定后, $\tilde{\mathbf{x}}_{\parallel}$ 可解得:

$$\tilde{\mathbf{x}}_{\parallel} = \mathbf{V}_{21} \mathbf{z}_1 + \mathbf{V}_{22} \mathbf{z}_{\parallel} = \mathbf{V}_{21} \mathbf{V}_{11}^{-1} \tilde{\mathbf{x}}_1 + (\mathbf{V}_{21} \mathbf{V}_{11}^{-1} \mathbf{V}_{12} \mathbf{A}_{\parallel}^{-1} - \mathbf{V}_{22} \mathbf{A}_{\parallel}^{-1}) \hat{\mathbf{B}}_{\parallel} \mathbf{u} \quad (9)$$

2 用简单电力系统模型验证模态摄动降阶法

2.1 模型建立及降阶的实现

假设一单机无穷大系统,不考虑电力系统稳定器,同时认为在分析过程中原动机转矩不变。可以写出如下方程^[7,8]:

$$p\Delta\delta = \omega_0 \Delta\omega$$

$$M p \Delta\omega = -(K_1 \Delta\delta + K_2 \Delta E'_q)$$

$$(1 + K_3 \tau_{do} p) \Delta E'_q = K_3 (\Delta E_{qe} - K_4 \Delta\delta)$$

$$(1 + \tau_e p) \Delta E_{qe} = -k_u \Delta U_t$$

式中 E'_q 为暂态电势; E_{qe} 为强制空载电势; ΔU_t 为发电机端电压偏差量; δ 为功角; K_1, K_2, K_3, K_4 对应于某一初始运行方式下的常数; k_u 为总的放大倍数; τ_e 为时间常数。

可以将上述方程写成如下形式:

$$\begin{bmatrix} \Delta\dot{\delta} \\ \Delta\dot{\omega} \\ \Delta\dot{E}'_q \\ \Delta\dot{E}_{qe} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega_0 & 0 & 0 \\ \frac{-K_1}{M} & 0 & \frac{-K_2}{M} & 0 \\ \frac{-K_4}{\tau_{do}} & 0 & \frac{-1}{K_3 \tau_{do}} & \frac{1}{\tau_{do}} \\ 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{\tau_e} \end{bmatrix} \mathbf{H} + \mathbf{D} \Delta U_t$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \Delta\delta \\ \Delta\omega \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{qe} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{-k_u}{\tau_e} \end{bmatrix}$$

如果 $K_1 = 0.6566, K_2 = 1.1697, K_3 = 0.6000, K_4 = 0.9358, M = 9.0 \text{ s}, \tau_{do} = 7.7 \text{ s}, k_u = 50, \tau_e = 0.05 \text{ s}$ 。

假设发电机端电压变化 $0.05(\text{p.u.})$, 利用模态摄动降阶法对上述状态空间方程降阶处理, 分别将四阶的模型降为三阶、二阶和一阶。在三阶处理过程中, 以功角、转速及暂态电势的变化量为重要状态变量; 在二阶的处理过程中, 以功角和转速的变化量为重要状态变量; 降为一阶的处理过程中, 以功角的变化量为重要状态量。

为了分析和说明降阶的实际情况, 每种降阶的结果均以 4 个状态变量降阶前后的动态特性曲线表示效果。如图 1~4 所示, 图中实线为降阶前的曲线, 虚线为降阶后的曲线。

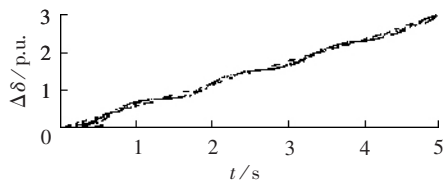


图1 $\Delta\delta$ 降阶前后的动态特性曲线

Fig.1 The dynamic characteristic curve of $\Delta\delta$ before and after order reduction

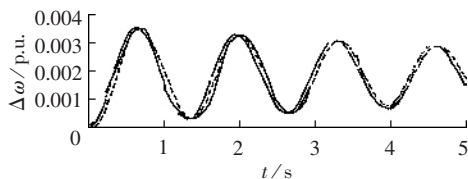


图2 $\Delta\omega$ 降阶前后的动态特性曲线

Fig.2 The dynamic characteristic curve of $\Delta\omega$ before and after order reduction

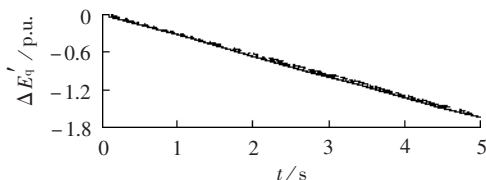


图3 $\Delta E'_q$ 降阶前后的动态特性曲线

Fig.3 The dynamic characteristic curve of $\Delta E'_q$ before and after order reduction

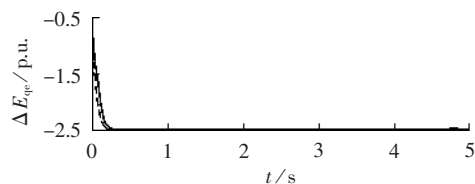


图4 ΔE_{qe} 降阶前后的动态特性曲线

Fig.4 The dynamic characteristic curve of ΔE_{qe} before and after order reduction

2.2 利用模态摄动法降阶的效果分析

由图 1~4 可知, 利用模态摄动法将四阶系统降为三阶、二阶和一阶时, 始终为重要状态变量的 $\Delta\delta$ 之变化曲线与降阶前基本重合; 而 $\Delta\omega$ 由于在原系统降为一阶时被作为非常重要状态变量, 而这和实际系统存在差异, 导致降为一阶时的变化曲线与降阶前存在误差, 而在原系统降为三阶、二阶时的变化曲线与降阶前基本一致; 状态变量 $\Delta E'_q$ 在原系统降为三阶、二阶和一阶时, 不管它是否作为重要状态变量其变化曲线与降阶前近似重合; 另一个状态变化量 ΔE_{qe} 在降阶过程中始终作为非重要状态变量, 其降阶前后的曲线于动态变化过程中始终作为非重要状态变量, 其降阶前后的曲线于动态变化过程中的起始阶段 (0.2 s 以内) 存在一定误差, 其后曲线基本重合。进一步分析可知, 原系统

降为三阶时,重要状态变量 $\mathbf{x}_I = [\Delta\delta \quad \Delta\omega \quad \Delta E'_q]^T$ 之变化曲线与降阶前基本重合,而非重要状态变量 $\mathbf{x}_{II} = \Delta E_{qe}$ 曲线与降阶前也极为接近,且满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} [\tilde{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{x}(t)] \approx 0$;降至二阶时,重要状态变量和非重要状态变量之变化曲线在降阶前后仍然基本重合,与降至为三阶的效果极为接近;在将四阶系统降阶为一阶时,由图1中可发现,重要状态变量 $\mathbf{x}_I = \Delta\delta$ 之曲线与降阶前基本重合,而非重要状态变量 $\mathbf{x}_{II} = [\Delta\omega \quad \Delta E'_q \quad \Delta E_{qe}]^T$ 的曲线在降阶前后则存在一定误差,这种误差主要反映在状态变量 $\Delta\omega$,即转速的变化量上,但是这时误差的最大值仅为0.00175,而且仍满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} [\tilde{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{x}(t)] \approx 0$ 。产生的原因一方面是在模态摄动降阶法中采用了式(6)的假设,可见,对于一个实际系统,如果这种假设条件与实际情况有相异时,相应降阶处理的精度就将随之降低。另一方面是此时将一个较大主导度对应的特征值定义为非主导特征值,显然必然影响降阶的精度。

注:在本文中仅考虑降阶前后的效果,至于系统本身是否稳定可以不予讨论。

3 结论

当利用模态摄动法进行降阶处理时,只要合理选择重要状态变量及相应的主导特征值,就可以获得较好的降阶效果。如果希望降阶后的阶次尽量低,就必须对实际系统进行分析,看是否能近似满足式(6)以及综合考虑主导度的大小排序;否则,有某些非重要状态变量在降阶前后存在误差,但是误差不大而且仍能满足 $\lim_{t \rightarrow \infty} [\tilde{\mathbf{x}}(t) - \mathbf{x}(t)] \approx 0$ 。如果这种误差对系统运行是允许的,也能获得较好的降阶效果。

参考文献:

- [1] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York:Mcgraw-Hill,1994.
- [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] TAYLOR D G. Nonlinear control of electric machines:An overview[J]. **IEEE Control System Magazine**,1994,14(6):41-51.
- [4] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展[J]. 电力系统自动化,2002,26(17):66-70.
TANG Yong. Present situation and development of power system simulation technologies[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2002,26(17):66-70.
- [5] 龚乐年. 现代调节技术——基础理论与分析方法[M]. 南京:东南大学出版社,2003.
- [6] 刘海涛,龚乐年. 在评估动态系统特性中主导度的应用[J]. 江苏电机工程,2003,22(1):4-5.
LIU Hai-tao,GONG Le-nian. Application of the dominant degree in evaluation of system dynamic characteristic[J]. **Jiangsu Electrical Engineering**,2003,22(1):4-5.
- [7] 马大强. 电力系统机电暂态过程[M]. 北京:水利电力出版社,1988.
- [8] 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.

(责任编辑:汪仪珍)

作者简介:

刘海涛(1972-),女,湖北宜昌人,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,江西南昌人,教授,博士研究生导师,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;

徐波(1971-),女,陕西西安人,硕士,从事电力系统电力电子、电工理论方面的教学与研究工作。

Order reduction of power system dynamic model using mode act

LIU Hai-tao^{1,2},GONG Le-nian¹,XU Bo²

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

2. Dept.of Electric Engineering,Nanjing Institute of Technology,Nanjing 210013,China)

Abstract: When considering the nonlinear transient process in the operation analysis and control of power system with multiple machines and complex network,high order mathematical model always occurs,which brings difficulties to system analysis and calculation. Mode act order reduction method is introduced for it by proper selecting the significant state variables and their corresponding dominant eigenvalues. The successive order reduction equations are deduced in theory. With a simple power system model as an example,its effect is demonstrated from the modeling,order reduction implementation and results analysis.

Key words: mode act; power system; order reduction