

汽轮发电机组的调速系统参数辨识

张仰飞^{1,2}, 袁 越¹, 陈小虎², 郝思鹏²

(1. 河海大学 电气工程学院, 江苏 南京 210098;

2. 南京工程学院 电力工程系, 江苏 南京 210013)

摘要: 调速系统是汽轮发电机组的重要组成部分, 对其进行准确建模, 有利于提高汽轮发电机组的运行和控制水平。分析汽轮发电机组典型的调速系统, 确定其模型结构和需要辨识的具体参数, 进行调速系统参数可辨识性理论研究。得出在该模型下, 通过设置合适的观测点, 可唯一辨识调速系统量测环节的放大倍数、伺服机构时间常数、蒸汽容积效应的时间常数等参数。算例表明, 利用可控量电磁转矩作为输入、可观量转子转速和汽门开度作为输出, 以误差平方和倒数为目标函数, 采用进化策略法进行参数辨识, 能有效地辨识出调速系统的参数, 并且具有唯一性。

关键词: 汽轮发电机组; 调速系统; 参数辨识

中图分类号: TM 331

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)12-0032-03

0 引言

同步发电机组是电力系统的核心, 其建模问题, 一直是专家和广大电力工作者广泛重视和研究的热点。同步发电机组的建模研究分机理建模和辨识建模 2 种途径。具有工程实用价值的是采用这 2 种建模相结合的方法, 因为同步发电机组内部机理基本已知, 可先按机理列出数学模型, 再用辨识求出参数。有关汽轮同步发电机组的电气参数^[1]、机械参数^[2]辨识已取得很好的研究成果, 发展了多种有效的辨识算法^[3-7], 而其调速系统的参数辨识鲜有文献涉及。

汽轮机是原动机, 其调节系统最初都是转速调节系统, 一般称为调速系统。当原动机的负荷改变引起转速改变时, 调速系统动作, 根据转速改变的大小, 相应调节汽门开度, 以调节进汽量, 从而改变原动机的出力, 使功率达到新的平衡。

随着科学技术发展, 汽轮机调速系统由简单的直接调速发展为间接调节。信号传递由机械杠杆系统发展为机械-液压系统, 转速感受元件由机械式发展为液压式等多种型式, 调速系统动力油压由低压力发展为高压力, 工质由一般润滑油发展为抗燃油。本文以液压调速器为例, 以辨识其参数为目标, 选取特定数学模型, 分析参数可辨识性, 并用算例进行验证。

1 数学模型

描述汽轮发电机组的数学模型有很多种, 由于其电气模型、机械模型之间相互解耦, 辨识调速系统的参数时, 本文略写电气模型。

汽轮发电机组转子运动方程^[8-9]为

$$p\delta = \omega - \omega_s, \quad \tau_M p\omega = M_m - M_e - \tau_D p\delta \quad (1)$$

式中 δ 为 q 轴与系统公共参考轴的夹角; ω 为转子转速, ω_s 为系统公共参考轴转速, 一般取 $\omega_s = 1$; τ_M 为转子的惯性时间常数, τ_D 为阻尼时间常数; M_m 为机械转矩, M_e 为电磁转矩; p 为微分算子。汽轮机的数学模型^[8-9]为

$$\tau_r \frac{dM_m}{dt} + M_m = \mu \quad (2)$$

式中 τ_r 为蒸汽容积效应的时间常数; μ 为汽门开度。

汽轮机的液压调速器有旋转阻尼液压调速器和高速弹簧片液压调速器 2 种类型, 2 种液压调速器的基本原理一致, 可用相同的数学模型描述^[8-9]:

$$\tau_p \frac{d\mu}{dt} + \mu = K_\delta (\omega_{ref} - \omega) \quad (3)$$

式中 ω 为转子转速, 取标么值; K_δ 为量测环节放大倍数; τ_p 为伺服机构时间常数; $\omega_{ref} = \omega_0 + \mu_0 / K_\delta$ (稳态时)。

2 可辨识性分析

可辨识性分析是从理论上分析汽轮发电机组液压调速系统的参数能否唯一辨识, 这有助于预防不可唯一辨识时辨识的徒劳无功问题。进行可辨识性分析, 可采用线性模型, 因为模型是否为线性, 不影响可辨识性分析结论^[1], 只是具体地辨识参数时, 需要考虑辨识精度, 需选择非线性模型。本文分析时, 增量方程如下:

$$\begin{aligned} \frac{d\Delta\omega}{dt} &= \frac{\Delta M_m}{\tau_M} - \frac{\Delta M_e}{\tau_M} - \frac{\tau_p \Delta\omega}{\tau_M} \\ \frac{d\Delta M_m}{dt} &= -\frac{\Delta M_m}{\tau_r} + \frac{\Delta\mu}{\tau_r} \\ \frac{d\Delta\mu}{dt} &= -\frac{\Delta\mu}{\tau_p} - \frac{K_\delta \Delta\omega}{\tau_p} \end{aligned} \quad (4)$$

以 ΔM_e 为输入量, $\Delta\omega$ 为观测量, 以 $\tau_m, \tau_D, \tau_r, \tau_p, K_\delta$ 为待辨识参数。可写成如下向量形式:

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AX + BU, \quad Y = C_1 X + EU \\ X &= [\Delta\omega \quad \Delta M_m \quad \Delta\mu]^T, \quad Y = \Delta\omega, \quad U = \Delta M_e \end{aligned} \tag{5}$$
$$A = \begin{bmatrix} -\tau_D/\tau_M & 1/\tau_M & 0 \\ 0 & -1/\tau_r & 1/\tau_r \\ -K_\delta/\tau_p & 0 & -1/\tau_p \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\tau_M} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = [1 \quad 0 \quad 0], \quad E = [0]$$

对式(5)进行 laplace 变换并整理得:

$$G_1(s) = C_1(sI - A)^{-1}B + E = \frac{d_1(s^2 + e_1s + f_1)}{s^3 + a_1s^2 + b_1s + c_1} \tag{6}$$

其中, $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$ 均为化简过程中的待定系数, 表达为同步发电机组参数的函数:

$$a_1 = \frac{\tau_D}{\tau_M} + \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_p}, \quad d_1 = -\frac{1}{\tau_M}$$
$$b_1 = \frac{\tau_D}{\tau_M \tau_r} + \frac{\tau_D}{\tau_M \tau_p} + \frac{1}{\tau_r \tau_p}, \quad e_1 = \frac{1}{\tau_r} + \frac{1}{\tau_p}$$
$$c_1 = \frac{\tau_D + K_\delta}{\tau_M \tau_r \tau_p}, \quad f_1 = \frac{1}{\tau_r \tau_p}$$

由线性系统辨识理论知 $a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, f_1$ 可辨识^[1], 则有

$$\tau_M = -1/d_1 \tag{7}$$

$$\tau_D = -(e_1 - a_1)/d_1 \tag{8}$$

$$K_\delta = (e_1 f_1 - a_1 f_1 - c_1)/(d_1 f_1) \tag{9}$$

可见 τ_M, τ_D, K_δ 可唯一辨识(关于汽轮同步发电机组机械参数的辨识问题, 本课题组的研究成果另文发表), 而调速系统的参数 τ_r, τ_p 不可区分, 即非唯一可辨识, 可见, 选用单输入量单观测量时, 至此还不能唯一辨识同步发电机组液压调速系统参数。

下面增加汽门开度 $\Delta\mu$ 作为观测量, 分析 τ_r, τ_p, K_δ 的可辨识性, 相应的方程如下:

$$\dot{X} = AX + BU, \quad Y = C_2 X + EU \tag{10}$$

式中 $C_2 = [0 \quad 0 \quad 1]$; X, Y, U, A, B, E 同上。

对式(10)进行 laplace 变换并整理得:

$$G_2(s) = C_2(sI - A)^{-1}B + E = \frac{e_2s + f_2}{s^3 + a_1s^2 + b_1s + c_1} \tag{11}$$

其中, a_1, b_1, c_1, e_2, f_2 均为化简过程中的待定系数, 表达为同步发电机组参数的函数; a_1, b_1, c_1 同上, 又有

$$e_2 = K_\delta/(\tau_M \tau_p) \tag{12}$$

$$f_2 = K_\delta/(\tau_M \tau_r \tau_p) \tag{13}$$

由式(7)(8)(9)(12)(13)可计算得:

$$\tau_p = (c_1 + a_1 f_1 - e_1 f_1)/(e_2 f_1) \tag{14}$$

$$\tau_r = e_2/f_2 \tag{15}$$

由式(14)(15)可见, τ_r, τ_p 也可唯一辨识, 可见增加汽门开度作为观测量, 汽轮发电机组调速系统参数都可唯一辨识。

3 辨识算例

3.1 参数辨识方法

参数辨识方法有很多^[10], 其中进化策略 ES (Evolutionary Strategies)法^[1], 是德国科学家 Rechen-

berg I 及 Schwefel H-P 在 20 世纪 60 年代提出的, 用于解决多参数优化问题。在汽轮发电机组的电气参数、机械参数辨识的运用方面, 相对于其他辨识方法, 在辨识精度及计算时间等方面有显著优势^[1-2], 所以本课题也选用来辨识汽轮发电机的调速系统参数。ES 法的原理及步骤非常简单, 在此介绍多成员法的主要步骤。

a. 初始化。随机给出包含 μ 个个体的初始代, 每个个体由 n 个基因组成的基因类型确定, 基因类型决定了个体的适应性。

$$X_1 = (x_{1,1}, \dots, x_{1,n}), \dots, X_\mu = (x_{\mu,1}, \dots, x_{\mu,n}) \tag{16}$$

b. 变异。第 g 代每个父体变异产生一个后代, 子代的 l 分量构成如下:

$$X_M^{(g)} = X_{El}^{(g)} + Z_l^{(g)} \tag{17}$$

式中 E 表示父代; N 表示子代; $Z_l^{(g)}$ 一般为正态分布的随机向量。

c. 选择。在父代和子代的个体中选择 μ 个适应度最好的个体进入下一代。

具体参数辨识时, 可用 C++ 语言等编写好进化策略法辨识程序, 选待求量与已知量差值的平方和的倒数为目标函数, 如辨识调速系统参数时, 以转速和汽门开度为双观测量时, 目标函数为

$$I = 1.0 / \sum_{i=0}^n \{ [\mu_0(t_i) - \mu(t_i)]^2 + [\omega_0(t_i) - \omega(t_i)]^2 \} \tag{18}$$

式中 I 为目标函数值; n 为采样点数; $\omega_0(t_i), \mu_0(t_i)$ 为仿真计算产生的已知转速和汽门开度; $\omega(t_i), \mu(t_i)$ 为辨识过程中所求转速和汽门开度; t_i 为采样点 i 对应的时间。

3.2 算例验证

汽轮发电机组电磁转矩加一扰动在 1 s 内均匀降到原值的 80%, $\omega(t_0) = 1.0, M_e(t_0) = M_m(t_0) = \mu(t_0) = 0.8511, t_0 = 0, \tau_M = 0.65 \times 314.159\,26, \tau_D = 33.0$, 以上均为标么值。汽轮发电机组参数如表 1 所示。

表 1 汽轮发电机组参数

Tab.1 Parameters of synchronous generator unit

参数值	τ_r/s	τ_p/s	K_δ
设定值	0.45	0.50	20.08
初值 1	0.639 5	0.686 9	28.30
初值 2	0.255	0.364	16.06

用 C++ 语言编写好进化策略法辨识程序, 并辨识调速系统参数, 选待求量与已知量差值的平方和的倒数为目标函数, 以初值 1 辨识, 结果列于表 2, 以初值 2 辨识, 结果列于表 3。

表 2 调速系统参数辨识结果 1

Tab.2 Result 1 of speed-adjustable system parameter identification

代数	τ_r/s	τ_p/s	K_δ	目标函数值
100	0.451 394	0.501 209	20.777 1	1.593 06×10 ⁷
200	0.451 521	0.501 209	20.777 1	1.617 21×10 ⁷
500	0.451 424	0.501 102	20.777 1	1.686 15×10 ⁷
800	0.451 311	0.501 037	20.777 1	1.711 88×10 ⁷
设定值	0.45	0.50	20.08	

表 3 调速系统参数辨识结果 2
Tab.3 Result 2 of speed-adjustable
system parameter identification

代数	τ_r/s	τ_p/s	K_δ	目标函数值
100	0.451 394	0.501 202	20.777 1	$1.621\,58\times 10^7$
200	0.451 536	0.501 110	20.784 6	$1.668\,41\times 10^7$
500	0.451 536	0.501 110	20.784 6	$1.668\,41\times 10^7$
800	0.451 536	0.501 110	20.784 6	$1.668\,41\times 10^7$
设定值	0.45	0.50	20.08	

由表 2、表 3 可见,虽然初值相差很大,但调速系统参数的辨识结果都收敛,收敛速度也很快,而且精度都相当好。在全局优化时,可能局部会有微小的波动,因为调速系统的参数是和机械参数一起辨识的,但目标函数总是越来越好。

以表 2、表 3 辨识的结果作为已知量,在同样的电磁扰动下,计算电机的转速 ω_1 、 ω_2 ,再用 Matlab 画图程序,分别画出仿真计算设定的转速 ω_0 和 ω_1 、 ω_2 的对照图形,如图 1、2 所示(图中横坐标 a 为步长数),比较发现曲线拟合度很高,辨识精度比较好。

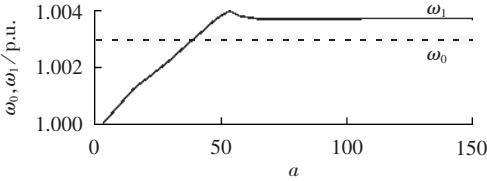


图 1 初值 1 辨识结果计算的转速与设定转速对照图
Fig.1 Speed comparison between enactment and
calculation with identification result 1

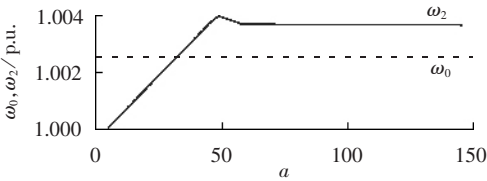


图 2 初值 2 辨识结果计算的转速与设定转速对照图
Fig.2 Speed comparison between enactment and
calculation with identification result 2

根据以上分析可知,特定模型下汽轮发电机组调速系统的参数是可唯一辨识的,辨识算例的结果也充分证明了理论分析是完全正确的,这有针对性地解决了不可辨识时的徒劳无功问题,为调速系统参数的在线辨识提供了理论依据。

4 结语

研究分析显示,汽轮发电机组液压调速系统参数是可以唯一辨识的,其他类型的调速系统的参数也可以用类似的方法进行研究,本课题组研究分析的结论也是可以唯一辨识的,当然调节系统的特性及运行工况很复杂^[11-14],有效的在线辨识需要考虑测量量的精度、辨识速度,还要注意抗干扰能力等,这些问题需要进一步研究。

参考文献:

[1] 鞠平. 电力系统非线性辨识[M]. 南京:河海大学出版社,1999.
[2] 张仰飞,鞠平. 同步水轮发电机组的机械参数辨识[J]. 水电自

动化与大坝监测,2006,30(1):8-10.
ZHANG Yang-fei,JU Ping. Mechanical parameter identification of synchronous water turbine generator unit[J]. Hydropower Automation and Dam Monitoring,2006,30(1):8-10.
[3] 丁富春,张明龙,李晋,等. 基于改进遗传算法的非线性发电机励磁系统参数辨识[J]. 继电器,2005,33(9):27-30.
DING Fu - chun,ZHANG Ming - long,LI Jing,et al. Parameters identification of nonlinear generator excitation system based on improved genetic algorithm[J]. Relay,2005,33(9):27-30.
[4] 杨琳,贺仁睦,马进,等. 基于实测的自并励励磁系统参数辨识[J]. 现代电力,2005,22(6):32-34.
YANG Lin,HE Ren - mu,MA Jin,et al. Identification of bus fed static excitation system parameters based on measured data[J]. Modern Electric Power,2005,22(6):32-34.
[5] 陈洁,马幼捷,周雪松,等. 基于 ITAE 法的励磁系统参数优化[J]. 天津理工大学学报,2005,21(5):65-68.
CHEN Jie,MA You - jie,ZHOU Xue - song,et al. Parameter optimization of excitation system based on ITAE method[J]. Journal of Tianjin University of Technology,2005,21(5):65-68.
[6] 黄梅,郝满江. 励磁系统模型可辨识性研究[J]. 北京交通大学学报,2006,30(2):101-103.
HUANG Mei,HAO Man - jiang. The research of excitation system model identifiability[J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2006,30(2):101-103.
[7] 贾善杰,童明光,刘世富,等. 聊城发电厂 600 MW 机组励磁系统建模分析[J]. 山东电力技术,2006(1):25-29.
JIA Shan - jie,TONG Ming - guang,LIU Shi - fu,et al. Liaocheng plant 600 MW generator excitation system model analysis [J]. Shandong Power Technology,2006(1):25-29.
[8] 倪以信. 动态电力系统理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002.
[9] 曹祖庆. 汽轮机调节动态特性[M]. 北京:水利电力出版社,1991.
[10] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社,1993.
[11] 刘惠娟,邹木春,余朝晖. 水轮机调速器电液随动系统 H_∞ 鲁棒控制研究[J]. 液压与气动,2006(8):36-39.
LIU Hui - juan,ZOU Mu - chun,YU Zhao - hui. Research on H - infinity robust control for the hydraulic turbine governor with the electro - hydraulic servo system[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics,2006(8):36-39.
[12] 朱卫国,王群京,肖本贤. 基于模糊神经网络的发电机调节器故障诊断研究[J]. 汽车电器,2006(7):8-10.
ZHU Wei - guo,WANG Qun - jing,XIAO Ben - xian. Fault diagnosis generator regulator based on fuzzy neural network[J]. Auto Electric Parts,2006(7):8-10.
[13] 降爱琴,郝秀芳. 某 300 MW 汽轮机电液调节系统基本控制功能分析[J]. 电力学报,2005,20(4):369-371.
JIANG Ai - qin,HAO Xiu - fang. Analysis of the basic control function of a 300 MW turbine DEH system[J]. Journal of Electric Power,2005,20(4):369-371.
[14] 崔远海. 同步发电机自调节 AVR 控制器的研究[J]. 中国电力,2004,37(10):14-17.
CUI Yuan - hai. Search of self - regulating AVR regulator for synchronous generator[J]. Electric Power,2004,37(10):14-17.
(责任编辑:柏英武)

作者简介:

张仰飞(1970-),男,江苏南京人,讲师,博士研究生,研究方向为电力系统建模(E-mail:zhangyf@njit.edu.cn);
袁 越(1966-),男,陕西西安人,教授,博士,研究方向为电力系统优化与控制;
陈小虎(1962-),男,江苏南京人,教授,博士,研究方向为电力系统自动化;
郝思鹏(1971-),男,江苏南京人,讲师,博士研究生,研究方向为电力系统稳定分析。

Speed-adjustable system parameter identification for steam turbine-generator unit

ZHANG Yang-fei^{1,2},YUAN Yue¹,CHEN Xiao-hu²,HAO Si-peng²

(1. Hohai University,Nanjing 210098,China;

2. Nanjing Institute of Technology,Nanjing 210013,China)

Abstract: The speed-adjustable system is an important part of the steam turbine generator unit,and its accurate modeling can enhance the operating and control level of the unit. Based on the analysis of typical speed-adjustable system of the steam turbine generator unit,its model frame and parameters to be identified are determined in its identifiability research. The conclusion shows that its parameters can be uniquely identified by setting proper observation points for the model, including the measure unit gain,the servo mechanism time constant,the steam volume effect time constant,etc.. Controllable variable electromagnetism torque is used as the input,and the observable variables rotor rotate speed and steam gate value are chosen as outputs. Taking the reciprocal of error square sum as the objective function,parameters are identified using the evolutionary strategy method and system parameters in the model are thus all determined. An example validates its effectiveness and uniqueness.

Key words: steam turbine-generator unit; speed-adjustable system; parameter identification