

基于相关辨识法的发电机励磁系统参数辨识

郭睿¹, 王修庞², 郭珊珊², 张亚娟²

(1. 华北电力大学电气工程学院, 北京 102206; 2. 南阳供电公司, 河南 南阳 473000)

摘要: 励磁系统参数辨识是电力系统四大参数辨识之一, 其准确性对于电力系统运行控制与仿真具有极其重要的意义。文章给出了相关辨识法估计励磁系统线性环节参数的详细步骤。在 Matlab/Simulink 中构造待辨识的励磁系统模型, 利用程序产生 M 序列伪随机信号并加入待辨识系统中进行参数辨识, 比较了不同噪声幅值情况下的辨识结果, 证明了在输入信号满足一定条件情况下, 相关辨识法在励磁系统参数估计中的有效性。

关键词: 励磁系统; 参数辨识; 伪随机二进制信号; Matlab/Simulink

The estimation of generator excitation system parameters based on correlation identification method

GUO Rui¹, WANG Xiu-pang², GUO Shan-shan², ZHANG Ya-juan²

(1. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China;
2. Nanyang Power Supply Company, Nanyang 473000, China)

Abstract: The excitation system parameter identification is important to the power system operation and control as well as simulation, and is one of the four vital parameters in power system. In this paper, the procedure of excitation system parameters estimation with the method of correlation identification is detailed. Then an excitation system model is built in Matlab/Simulink and a M serial pseudo random binary signal (PRBS) produced by software is chosen as perturbation signal. Comparisons are made in identification results with various noise magnitudes and proper advices on input signal selection are proposed in the end.

Key words: excitation system; parameter identification; pseudo random binary signal; Matlab/Simulink

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)05-0019-04

0 引言

通过励磁系统调节, 发电机可以调节其机端电压以及输出无功的大小和性质。维持发电机电压能力的要求和提高电力系统稳定的要求在许多方面是一致的。励磁模型结构及其参数的准确性对电力系统仿真结果的可信度有很大的影响^[1], 经典的系统辨识方法不论是参数模型还是非参数模型辨识, 大多采用人为控制的输入信号如阶跃信号, 二位式伪随机信号 (PRBS) 等^[2]。而电力系统在运行中一般不允许施加外来的扰动信号, 所以目前发电机励磁系统辨识研究中较多的是利用系统中安装的录波器捕获的大扰动信号进行辨识, 辨识算法往往采用现代的优化算法^[3,4]。但是这种辨识方法使得辨识结果的校验成了难题, 因为很难再获得同样的扰动。并且大扰动往往激发系统中的非线性, 目前还没有哪一种非线性模型能很好的描述系统中存在的各种非线性影响。当系统的输入信号或变量变化范围不大,

或者非线性不严重时可以人为地在稳态运行点线性化, 线性化后的励磁模型可以应用于电力系统小干扰稳定分析, 在考虑各种限制环节等非线性因素后可以应用于系统的动态稳定分析^[5]。无论从励磁系统本身控制性能还是整个系统仿真来看励磁系统线性环节的参数辨识很有必要。而线性系统辨识采用经典辨识方法非常有效。

本文的研究基于 Matlab/Simulink, 在其中搭建待辨识的线性化励磁系统模型, 采用最长线性移位寄存器序列 (简称 M 序列) 作输入利用相关分析法获得励磁系统的脉冲响应 (线性励磁系统的非参数模型) 从而估计励磁系统各个线性环节的参数。对比不同噪声幅值情况下的辨识结果得到一些对现场实际励磁系统参数辨识有指导意义的结论。

1 系统辨识的相关辨识法

根据系统辨识理论, 辨识方法可以分为经典辨识法和现代辨识法两类。经典辨识法在励磁系统参

数辨识中的应用较早,文献[6]就经典辨识方法做了详尽的介绍。在经典辨识法中,相关辨识法具有一些突出的优点:①具有信息滤波功能,当系统存在噪声干扰时,只要在统计学上不相关,就能够得到良好的辨识结果;②系统辨识不依赖于正常运行记录;③不要求有先验的统计学知识;④由于选择输入信号的强度不会影响发电机的正常运行比较适于在线辨识。相关辨识法的核心是维纳-霍甫(Wiener-Hops)方程。以如图1所示的待辨识系统为例来加以说明。

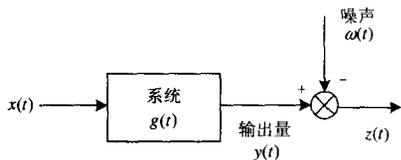


图1 待辨识系统模型

Fig.1 Model of identification system

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \int_0^T g(v) R_x(\tau - v) dv \quad (1)$$

式中: $R_x(\tau)$ 为输入信号 $x(t)$ 的自相关函数, $g(t)$ 为系统的脉冲响应, $R_{xy}(\tau)$ 为输入信号 $x(t)$ 和输出信号 $y(t)$ 之间的互相关函数, $z(t)$ 为叠加噪声后的输出量测信号。

若已知 $R_x(\tau)$ 和 $R_{xy}(\tau)$ 就可以解方程得到脉冲响应函数 $g(t)$ 从而获得系统的非参数模型。由脉冲响应利用 Hankel 矩阵法^[7]可以获得系统的参数模型。由于 M 序列的自相关函数接近于脉冲函数:

$$R_m(t) = \frac{1}{T} \int_0^T M(t)M(t+\tau)dt = \begin{cases} const, \tau = 0 \\ 0, \tau \neq 0 \end{cases} \quad (2)$$

且具有输入净扰动小,幅值、周期、时钟节拍易控制等优点,目前已普遍用作辨识输入信号。

设数据的采样时间等于 M 序列的移位脉冲周期 Δt , 且 M 序列的循环周期 $N_p \Delta t$ 大于过程的过渡时间 T_s 时,脉冲响应在时间大于 $N_p \Delta t$ 时基本上衰减为零,则 Wiener-Hops 方程可以写成离散形式

$$R_{mz}(k) = \sum_{j=0}^{N_p-1-k} g(j) R_m(k-j) \Delta t \quad (3)$$

其中相关函数的计算为

$$\begin{cases} R_{mz}(k) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=0}^{N_p-1-k} m(i-k)z(i) \\ R_m(k) = \frac{1}{N_p} \sum_{i=0}^{N_p-1-k} m(i-k)m(i) \end{cases} \quad (4)$$

根据 M 序列的性质可知,其自相关函数为

$$R_m(k) = \begin{cases} a^2, k = 0, N_p, 2N_p, \dots \\ -\frac{1}{N_p}, k \neq 0, N_p, 2N_p, \dots \end{cases} \quad (5)$$

把上式代入(3)式中,得到

$$R_{mz}(k) = \frac{(N_p+1)a^2\Delta t}{N_p} g(k) - \frac{a^2\Delta t}{N_p} \sum_{j=0}^{N_p-1-k} g(j) \quad (6)$$

由此可得到相关分析法辨识脉冲响应的公式:

$$\hat{g}(k) = \frac{N_p}{(N_p+1)a^2\Delta t} [R_{mz}(k) + c] \quad (7)$$

其中: $c = -\frac{a^2\Delta t}{N_p} \sum_{j=0}^{N_p-1-k} \hat{g}(j)$, 对于一个稳定过程来说, c 是一个有界常数且很小(当 N_p 充分大时)。

若系统中包含如图1中的量测噪声,设定试验信号 $x(t)$ 和输出噪声 $\alpha(t)$ 之间是统计独立的,且有零均值高斯分布概率密度函数,以及为平稳各态历经的随机过程。量测信号 $z(t)$ 含有输出量 $y(t)$ 和噪声 $\alpha(t)$, 而 $x(t)$ 与 $\alpha(t)$ 不相关,所以 $R_{x\alpha}(\tau) = 0$, 从而有

$$R_{xz}(\tau) = R_{xy}(\tau) + R_{x\alpha}(\tau) = R_{xy}(\tau) \quad (8)$$

可以看出式(8)中消除了噪声的影响。需要说明的是相关辨识法得到的是离散模型,由离散模型转换成常用的连续模型一般采用双线性变换。设离散模型为

$$H(z^{-1}) = \frac{\beta_0 + \beta_1 z^{-1} + \dots + \beta_{n-1} z^{-(n-1)} + \beta_n z^{-n}}{1 + \alpha_1 z^{-1} + \alpha_2 z^{-2} + \dots + \alpha_{n-1} z^{-(n-1)} + \alpha_n z^{-n}} \quad (9)$$

式中: z 为运算符,它和运算符 s 的关系是 $z = e^{Ts}$,

利用双线性变换公式 $z^{-1} = \frac{2-Ts}{2+Ts}$

将离散模型转换为连续模型:

$$G(s) = \frac{b_n s^n + b_{n-1} s^{n-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (10)$$

式中: $\tau = -dT$, T 为采样时间。

2 参数辨识试验设计

出于电力系统安全稳定运行的考虑,系统辨识中需要的人为施加的各种输入信号应用于电力系统辨识时一定要慎重。一般的做法是先在仿真系统中搭建实验模型利用不同的输入信号进行辨识,最后选择对实际系统扰动最小而且辨识效果较好的信号和方法应用于实际。本文的研究是在 Matlab/Simulink 中进行。

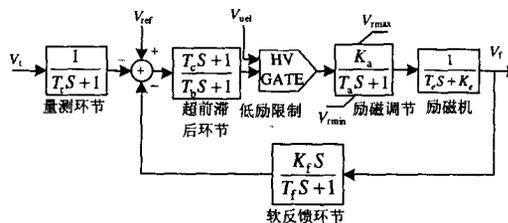


图2 励磁系统结构图

Fig.2 Block of excitation system

励磁系统结构框图如图 2, 它类似于 IEEE1969 年推荐的 TYPE1 型 (忽略励磁机饱和环节) 包括测量环节, 超前滞后环节, 低励限制环节, 励磁调节器, 励磁机以及励磁软反馈环节。框图中 V_t 为机端电压有效值, V_{ref} 是电压参考值, V_{uel} 为低励限制门限, V_{rmax} 和 V_{rmin} 分别是励磁调节器输出的上下限幅值, V_f 是励磁电压。低励限制和励磁调节限幅环节是典型的逻辑非线性环节, 由于施加的 M 序列伪随机信号的幅值进行了严格的控制, 这些限制环节肯定不会动作, 所以这些环节可以省略。根据待辨识系统的特点, 忽略超前滞后环节, 只辨识测量环节时间常数 T_f , 励磁调节器放大倍数 K_a 和时间常数 T_a , 励磁绕组的传递函数参数 T_e 、 K_e 以及励磁软反馈的 K_f 、 T_f 。

去除非线性环节后在 Matlab/Simulink 中搭建相同的励磁系统, 模型传递函数框图及参数如图 3, 由于没有采用机端电压作为输入所以把信号叠加点的参考电压去掉, 为了待辨识系统自身的稳定, 把励磁稳定器输出信号设置成负反馈, 这些改动不影响系统的参数估计。

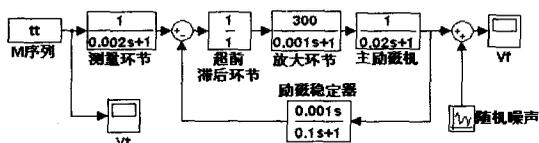


图 3 仿真用励磁系统结构图

Fig.3 Block of excitation system for simulation

由图 3 可以得到标准的传递函数

$$H(S) = \frac{b_1 s + b_0}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (11)$$

这是一个 4 阶模型, 其中:

$$b_0 = K_a \quad (12)$$

$$b_1 = \frac{K_a}{T_f T_a T_e} \quad (13)$$

$$1 = T_a T_e T_f T_r \quad (14)$$

$$a_3 = \frac{1}{T_r} + \frac{K_e}{T_e} + \frac{1}{T_f} + \frac{1}{T_a} \quad (15)$$

$$a_2 = \frac{K_e}{T_e T_r} + \frac{1}{T_f T_r} + \frac{1}{T_a T_r} + \frac{K_e}{T_e T_f} + \frac{K_e}{T_e T_a} + \frac{1}{T_a T_f} + \frac{K_a K_f}{T_a T_f T_r} \quad (16)$$

$$a_1 = \frac{T_a K_e + T_e + T_f K_e + T_r K_e + K_a K_f}{T_a T_e T_f T_r} \quad (17)$$

$$a_0 = \frac{K_e}{T_a T_e T_f T_r} \quad (18)$$

如果(12)~(18) 7 个方程式中等号左边的参数可以辨识得到的话就可以利用上面的方程采用非线性方程组的牛顿-拉夫逊法求得励磁系统各个环节的 7 个待辨识参数。

3 辨识步骤及结果分析

1) 选择合适的 M 序列参数, 并在 Matlab 中生成该伪随机信号序列, 在励磁系统 V_t 输入端输入此随机信号。

2) 采集数据时, 当 M 序列刚刚加上, 在非零初始条件下, 过程的输出在一段时间内是非平稳的。为了保证辨识精度, 要避开这段非平稳过程, 一般可从第二个循环周期开始采集数据。

3) 计算互相关函数, 取补偿量为 $c = -R_{nc}(N_p - 1)$, 计算脉冲响应估计值 $\hat{g}(k)$ 。

4) 用 Hankel 矩阵法确定离散模型参数的值, 获得形如式 (9) 的参数形式离散模型。

5) 经双线性变换得到形如式 (10) 的连续模型参数的估计值。

6) 利用牛顿-拉夫逊法求解非线性方程组获得待辨识励磁系统各个环节的参数。

辨识过程中 M 序列参数为: 幅值 $a=1$, 码宽: $\Delta t=0.01$ s, M 序列信号周期: (10,3), 周期个数: 7 个, 总的仿真时间为 92.07 s, 计算平均值中不计入第一个周期。表 1 列出不同噪声幅值下的辨识结果。

表 1 不同噪声幅值情况下辨识结果对比

Tab.1 Comparison of results received from different noise levels

参数 (实际值)	K_a (300)	K_e (1)	K_f (0.001)	T_f (0.001)	T_e (0)	T_f (0.1)	T_f (0.02)
辨识值 (无噪声)	300.162	1.012	0.000991	0.00101	0.000145	0.101	0.0201
相对误差	0.054%	1.2%	0.88%	1.2%	/	1%	0.65%
辨识值 (噪声 5%)	298.78	0.9891	0.00103	0.000979	0.000221	0.0984	0.0195
相对误差	0.407%	1.09%	3.1%	2.13%	/	1.6%	2.5%
辨识值 (噪声 10%)	294.707	0.9574	0.000953	0.000951	0.000123	0.0957	0.0191
相对误差	1.7645%	4.26%	4.66%	4.86%	/	4.3%	4.75%

从表 1 的辨识结果可以看出, 相关辨识法在有噪声干扰的情况下, 仍然可以较好的辨识出参数, 但是随着噪声的比例的不断增大, 辨识的精度也会随之降低。这是由于加入的 M 序列伪随机信号, 虽

然性质与白噪声相似, 但是只有当其信号无限长时, 它才能更好的模拟白噪声。而实际辨识过程中, 受到辨识时间等条件的限制, 只能选取一定长度的周期信号, 所以在噪声干扰的情况下, 会牺牲一定的

辨识精度。此外辨识参数误差还有一部分来自离散模型到连续模型的转换,这也是近年来连续模型参数辨识引起人们重视的一个原因^[8]。但是从图4给定参数模型与在10%噪声情况下辨识参数模型的励磁系统阶跃响应仿真对比曲线可以看出在10%噪声幅值情况下的辨识结果也可以满足仿真准确性的要求。阶跃仿真在Matlab/Simulink中进行,3.0s时给电压参考 V_{ref} 加5%18.0s时恢复 V_{ref} 到原值,记录励磁电压 V_f 的变化曲线。

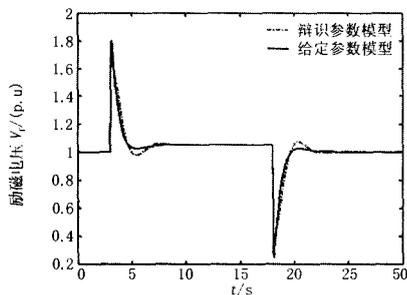


图4 阶跃响应仿真

Fig.4 Step response simulation

采用相关辨识法进行参数估计必须注意以下几点:

(1) 预估过程的过渡时间 T_s 和过程的最高截止频率 f_{max} ,这两者是选择M序列参数的重要依据。如果 f_{max} 未知时,可以通过试验来测取 Δt 。若 Δt 选择比较合适,过程的输出响应就会出现比较复杂的振荡波形,过程的所有模态基本上都已被激励,利用这样的数据可以获得比较高的辨识精度。

(2) 数据必须尽可能包含过程动态特征的信息当过程的频率特性接近于低通滤波特性时,M序列的参数选择应满足以下条件:

$$\frac{1}{3\Delta t} \geq f_{max} \quad (19)$$

$$(N_p - 1)\Delta t > T_s \quad (20)$$

通常取 $N_p = 1.2 \sim 1.5 \frac{T_s}{\Delta t}$

式(19)表明,M序列的频带必须覆盖住过程的频带,这样才能充分激励过程的所有模态;式(20)表明,M序列的循环周期必须大于过程的过渡时间,以保证时间大于 $N_p\Delta t$ 后,脉冲响应衰减接近于零。

4 结论

(1) 采用伪随机信号的相关分析法是线性系统

参数辨识的有效方法,特别是在噪声情况下。

(2) 相关分析法获得的是离散形式的模型,必须利用一定的转换方法获得人们熟悉的传递函数模型。

(3) 伪随机信号的频率和幅值必须满足一定的条件才可以应用于励磁系统参数的实际辨识,在此之前在仿真软件中的试验是必须的。

参考文献

- [1] ZHU Shou-zhen, SHEN Shan-de, CHEN Hou-lian, et al. Effects of Excitation System Parameters on Power System Transient Stability Studies[A]. In: IEE 2nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management[C]. Hongkong: 1993.
- [2] 徐南荣,宋文忠,夏安邦.系统辨识[M].南京:东南大学出版社,1991.
- [3] YAO Xiao-yin, Karady G G, Farmer R G, et al. Estimation of Generator Excitation-System Parameters by Tabu Search[A]. In: IEEE PES Winter Meeting[C]. Columbus (USA):2001.1185-1190.
- [4] 舒辉,文劲宇,罗春风,等.含有非线性环节的发电机参数辨识[J].电力系统自动化,2005,29(6):66-70.
- [5] SHU Hui, WEN Jin-yu, LUO Chun-feng, et al. Nonlinear Parameters Identification for Synchronous Generator Excitation Systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2005,29(6):66-70.
- [6] 李基成.现代同步发电机励磁系统设计及应用[M].北京:中国电力出版社,2002.
- [7] 沈善德.电力系统辨识[M].北京:清华大学出版社,1993.
- [8] 方崇智,萧德云.过程辨识[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [9] 贺尚红.连续动力学系统参数模型辨识及工业试验(博士学位论文)[D].武汉:中南大学,2002.

收稿日期:2007-08-16

作者简介:

郭睿(1979-),男,研究生,主要研究方向为电力系统分析与控制;E-mail:tourist89266@163.com

王修彪(1977-),男,工程师,从事超高压变电管理与运行;

郭珊珊(1980-),女,硕士研究生,主要研究方向为人工智能与自然语言。