

基于LIF法的励磁系统参数辨识

曹浩军, 张承学, 单勇

(武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 介绍了一种采用线性积分滤波器(LIF)的连续时间辨识方法, 借以辨识励磁系统参数, 使用线性积分滤波器可以完全消除积分方程初始条件的影响, 即在非零初始条件下无需辨识初始条件依然能得到精确的结果。在仿真研究中, 以 IEEE ACIA 型标准励磁系统为例采用 LIF 法进行了参数辨识。

关键词: 励磁系统; 参数辨识; LIF法; LIF法

中图分类号: TM761 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2004)15-0005-05

0 引言

随着现代电力系统的发展, 同步发电机励磁系统对电力系统稳定的影响越来越受到人们的重视, 为了在电力系统稳定计算中考虑励磁系统的作用, 必须有稳定计算用的励磁系统数学模型。然而通常在研究中采用的典型模型和典型参数与实际机组运行的情况有一定出入。研究表明, 使用不同的励磁系统模型参数将对电力系统暂(动)态行为分析起不同的影响^[8]。所以辨识励磁系统模型参数, 已得到了国内外学者的普遍重视, 人们运用不同的系统辨识理论, 结合励磁系统的特点提出一系列的励磁系统参数辨识方法, 主要分频域辨识法和时域辨识法两类。目前, 国外对时域法的研究主要集中在离散域, 即离散时间辨识方法; 在国内, 沈善德教授首先将连续时间辨识方法引入到电力系统辨识中, 其中 LIF 法得到广泛使用且取得了好的辨识效果, 本文在已有的研究基础上, 对连续时间辨识方法作进一步的讨论并引入 LIF 法, 在最后的仿真研究中, 采用 LIF 法对 IEEE ACIA 模型的参数进行了辨识。

1 连续时间辨识方法

连续时间模型的参数辨识已经有较长的历史, 辨识方法通常都是基于系统的传递函数和描述系统动态过程的微分方程。而连续时间模型辨识的一个主要困难在于输入输出信号的导数不能直接量测并且求导过程会增加噪声的影响。从历史的角度看, 曾经有两种并行的方法可以用来逃避对时间的求导, 一种是多重积分法, 另一种是状态变量滤波法。近年来, 又发展了非传统离散时间算子法(算子法)。本文针对连续时间辨识方法在电力系统辨识中应用的现状, 仍欲就多重积分法作进一步的讨论。

多重积分法是将要求解的微分方程转换为等价的积分方程, 再利用正交函数和正交多项式导出相应的积分运算矩阵, 实现对多重积分的近似, 最终将微分方程转化为代数方程, 然后采用最小二乘法求出未知参数。

假设待辨识系统的常微分方程形式如下:

$$a_n x^{(n)}(t) + a_{(n-1)} x^{(n-1)}(t) + \dots + a_0 x(t) = b_m u^{(m)}(t) + \dots + b_0 u(t)$$

简记为:

$$\sum_{i=0}^n a_{n-i} p^{n-i} x(t) = \sum_{i=0}^m b_{m-i} p^{m-i} u(t) \quad (1)$$

式中: p 代表微分算子, 即 $p = d/dt$; $x(t)$ 是实际输出; $u(t)$ 是实际输入。再定义一个积分算子 p^{-1} ,

$p^{-1} f(t) = \int_{t_0}^t f(t_1) dt_1$, 对方程(1)两边进行 n 次积分, 得:

$$\sum_{i=0}^n a_{n-i} p^{-n} p^{n-i} x(t) = \sum_{i=0}^m b_{m-i} p^{-n} p^{m-i} u(t) \quad (2)$$

使用积分算子 p^{-1} 来消掉微分算子 p 就可以推导出如下形式的积分方程(证明略):

$$\begin{cases} \sum_{i=0}^n a_{n-i} p^{-i} x(t) = \sum_{i=n-m}^n b_{n-i} p^{-i} u(t) + \sum_{i=1}^n c_i (t-t_0)^{i-1} \\ c_i = \sum_{j=0}^{i-1} a_{n-j} p^{i-j-1} x(t_0) / (i-1)!, \quad i = 1, 2, 3, \dots, (n-m) \\ c_i = \left[\sum_{j=0}^{i-1} a_{n-j} p^{i-j-1} x(t_0) - \sum_{j=n-m}^{i-1} b_{n-j} p^{i-j-1} u(t_0) \right] / \end{cases} \quad (3)$$

这样初始条件的影响就完全包含在 $\sum_{i=1}^n c_i (t-t_0)^{i-1}$ 当中了, 可以观察到其影响将随时间而增长。

在初始条件全为零的情况下,式(3)右边第2项不存在,可直接辨识参数 a_i 和 b_i ,当初始条件不全为零时,则需要连同 c_i 一起辨识,才能取得好的辨识结果。通常采用 PLPF 法近似多重积分运算,都假设初始条件为零,倘若这一条件不能满足,按 PLPF 法辨识得到的结果势必受到很大影响,而 LIF 法很好地解决了这一问题。

2 线性积分滤波法(LIF)

如果深入分析 PLPF 法,我们会发现采用 PLPF 法近似多重积分运算其实就是在整个区间 $[t_0, t]$ 采用复化梯形公式的数值积分法,如果连续时间信号 $x(t)$ 不是在整个时间区间内积分,而是在有限时间区间 $[t-lT, t]$ 上的积分,则可近似计算如下:

$$I_1 x(t) = \int_{t-lT}^t x(\tau) d\tau = f_0 x(t) + f_1 x(t-T) + \dots + f_l x(t-lT) = \sum_{i=0}^l f_i x(t-iT) \quad (4)$$

这里, T 为采样间隔; l 称作线性积分滤波器的长度因子(自然数);系数 f_i 由数值积分公式来决定,当采用复化梯形公式时,有

$$f_0 = f_l = T/2 \quad (5)$$

$$f_i = T, i=1, 2, \dots, l-1$$

引入单位延迟算子 q^{-1} , $q^{-1}x(t) = x(t-T)$

则式(4)可写成:

$$I_1 x(t) = \int_{t-lT}^t x(\tau) d\tau = \sum_{i=0}^l f_i q^{-i} x(t) \quad (6)$$

定义 $x(t)$ 在时间区间 $[t-lT, t]$ 上的多重积分为:

$$I_j x(t) = \int_{t-lT}^t \int_{t_1-lT}^{t_1} \dots \int_{t_{j-1}-lT}^{t_{j-1}} x(t_j) dt_j dt_{j-1} \dots dt_1, j=0, 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$I_0 x(t) = x(t)$, $I_1 x(t)$ 为式(6)

进而, $x^{(j)}(t)$ 的 n 重积分可近似计算如下(证明见文献[5]):

$$I_n x^{(j)}(t) = J_j x(t) \quad (8)$$

多项式 J_j 形式如下:

$$J_j = (1 - q^{-1})^j (f_0 + f_1 q^{-1} + \dots + f_l q^{-l})^{n-j}, j=0, 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

公式的系数 f_i 由式(5)给出。可以把式(9)看作是一类有限长单位冲激响应(FIR)数字滤波器,故称其为线性积分滤波器。 l 的选取应使线性积分滤

波器的有效频带尽可能覆盖被辨识对象的主要工作频带,这样还可具有滤除测量噪声的作用,减少噪声影响,并提高辨识精度。

由于输入输出信号常以离散形式出现,故给出式(8)的离散形式:

$$I_n x^{(j)}(k) = J_j x(k) = (1 - q^{-1})^j (f_0 + f_1 q^{-1} + \dots + f_l q^{-l})^{n-j} x(k) \quad (10)$$

当采用复化梯形公式时,式(9)还可以写成

$$J_j = J_j^* T(q^{-1})$$

这里

$$J_j^* = (1 - q^{-1})^j \left[\frac{T}{2} (1 + q^{-1}) \right]^{n-j}$$

$$T(q^{-1}) = (1 + q^{-1} + \dots + q^{-l+1})^n$$

如果对式(1)在有限时间区间 $[t-lT, t]$ 上进行 n 次积分,并引入式(8),不但可以解决对时间求导的问题,而且还可以完全消除初始条件问题,即得到的方程中不会出现式(3)右边第2项^[4],方程为:

$$\sum_{i=0}^n a_n \cdot J_{n-i} x(t) = \sum_{i=0}^m b_m \cdot J_{n-i} u(t) + (t, T) \quad (11)$$

(t, T) 是对输入输出进行数值积分后产生的截断误差。

文献[6]提出两种线性积分滤波法的方程模型,即 DN 模型(differentially-normalized model)和 IN 模型(integrally-normalized model),两种模型的回归方程如下。

DN 模型:

$$J_n x(k) = \frac{T}{D}(k) = D + D(k) \quad (12)$$

其中:

$$\frac{T}{D}(k) = [- J_{n-1} x(k) \dots - J_0 x(k) \quad J_m u(k) \dots J_0 u(k)]$$

$$\frac{T}{D} = \left[\frac{a_{n-1}}{a_n} \dots \frac{a_0}{a_n} \frac{b_m}{a_n} \dots \frac{b_0}{a_n} \right]$$

IN 模型:

$$J_0 x(k) = \frac{T}{I}(k) = I + I(k) \quad (13)$$

其中

$$\frac{T}{I}(k) = [- J_n x(k) \dots - J_1 x(k) \quad J_m u(k) \dots J_0 u(k)]$$

$$\frac{T}{I} = \left[\frac{a_n}{a_0} \dots \frac{a_1}{a_0} \frac{b_m}{a_0} \dots \frac{b_0}{a_0} \right]$$

文献[6]进一步指出采用 IN 模型的参数辨识结果较之 DN 模型更为精确。可以根据励磁系统数学模型的特点,适当选用其一。若以 IN 模型为例,我们可以求出式(13)中参数向量 I 的加权最小二乘估计为

$$\hat{I} = \arg \min \sum_{k=1}^N N^{-k} [J_0 x(k) - \hat{I}(k)]^2 \quad (14)$$

则

$$\hat{I} = \bar{R}^{-1}(N) f(N) \quad (15)$$

这里,

$$\bar{R}(N) = \sum_{k=1}^N N^{-k} I(k) I^T(k)$$

$$f(N) = \sum_{k=1}^N N^{-k} I(k) J_0 x(k)$$

使用线性积分滤波法,可以完全消除非零初始条件的影响,而 HLPF 法欲在非零初始条件下得到准确的辨识结果则需要增加辨识参数的数目,阶数越高,辨识的难度越大。故 LIF 法较之 HLPF 法更为灵活,又因为 LIF 法与 HLPF 法本质上都是采用了复化梯形公式的数值积分法,所以 LIF 和 HLPF 法在零初始条

件下会得到相同精度的辨识效果。

3 励磁系统参数辨识仿真

这里,使用 Matlab 的 Simpowersystem 工具箱提供的典型电力设备模型建立一个单机无穷大系统仿真模型,对其中的励磁系统进行参数辨识,由于 Simpowersystem 工具箱仅提供了一种未考虑励磁机饱和系数的直流励磁系统模型,为了使仿真研究更具代表性,重新建立了 IEEE ACIA 型交流励磁系统模型,值得注意的是,用户自定义模型在用于仿真前,必须进行初值平衡,可参考文献[13],ACIA 模型的特点是分别考虑了饱和、励磁机电枢反应和整流器换相压降等因素,饱和系数由 S_E 予以表示,励磁机的电枢反应和换相压降分别由 K_D 和 K_C 系数予以表示,其模型方框图如图 1 所示。

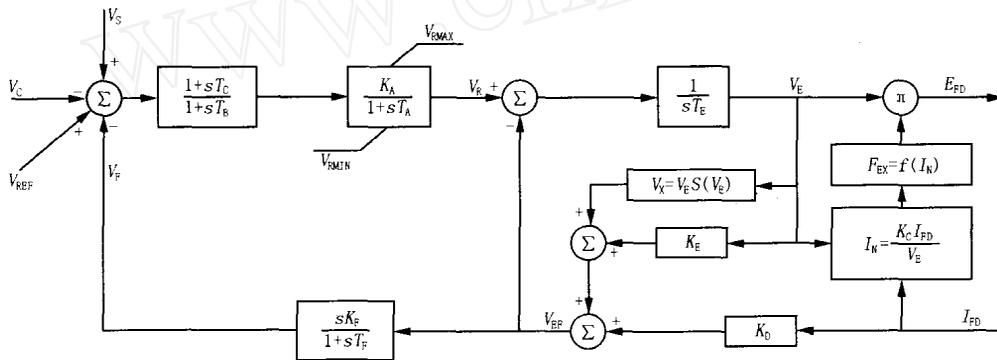


图 1 IEEE ACIA 型励磁系统标准模型(1992)

Fig. 1 Standard model of IEEE ACIA-based excitation system(1992)

其中励磁机饱和系数定义为:

$$S_E[V_E] = \frac{C - B}{B} \quad (17)$$

式中: B 、 C 是由交流励磁机气隙线及空载饱和特性曲线所确定的系数。在进行励磁系统数学模型计算时,须将饱和系数以数学表达式表示,其表达式有多种,其中之一如式(18)所示:

$$S_E = C_1 e^{C_2 V_E} \quad C_1, C_2 \text{ 为待定系数} \quad (18)$$

通常饱和系数的确定应考虑到励磁工作点的变化,一般由交流励磁机空载顶值输出电压 V_{E1} 及 $0.75 V_{E1}$ 确定。由图 2 可知

$$V_{EF} = K_E V_E + S(V_E) V_E + K_D I_{FD} \quad (19)$$

$$V_R - V_{EF} = s T_E V_E \quad (20)$$

联立式(19)和(20),可得到一阶非线性微分方程如下

$$s T_E V_E + K_E V_E + S(V_E) V_E = V_R - K_D I_{FD} \quad (21)$$

再考虑到整流器外特性有 3 种工作状态,即

第 1 种换相状态: $F_{EX} = 1 - 0.58 I_N$, $I_N < 0.433$

第 2 种换相状态:

$$F_{EX} = \sqrt{0.75 - I_N^2}, \quad 0.433 < I_N < 0.75$$

第 3 种换相状态:

$$F_{EX} = 1.732(1 - I_N), \quad I_N > 0.75$$

而通常情况下,整流器工作在第 1 种换相状态下,考虑在此情况下,

$$F_{FD} = F_{EX} V_E, \quad F_{EX} = 1 - 0.58 I_N, \quad I_N = K_C I_{FD} / V_E$$

可以得到如下方程:

$$E_{FD} = V_E - 0.58 K_C I_{FD} \quad (22)$$

到此为止,需要辨识的 AC1 模型中的参数分别有线性环节的参数及式(21)、(22)中包含的参数,其

非线性环节的参数有:励磁电压软反馈放大倍数和时间常数 K_F 、 T_F ,综合放大控制环节的放大倍数和时间常数 K_A 、 T_A ,综合放大控制环节自身的超前—滞后时间常数 T_C 、 T_B ,由于 T_C 和 T_B 的值一般很小,故予以忽略。式(21)中由于含有饱和系数 S_E ,不利于使用LIF法,可以依照文献[14]提出的方法,将 S_E 在 V_{BD} 处展开成关于 $(V_E - V_{BD})$ 的泰勒公式

$$S_E = C_1 e^{C_2 V_{BD}} + C_1 C_2 e^{C_2 V_{BD}} (V_E - V_{BD}) + (1/2!) C_1 C_2^2 e^{C_2 V_{BD}} (V_E - V_{BD})^2 + \dots \quad (23)$$

由于 V_E 在 V_{BD} 附近变动,可以取前三项做 S_E 的近似而忽略高阶项,代入式(21)中。最后采用LIF法对线性环节及式(21)、(22)的参数进行辨识。当进行仿真实验时,在励磁系统模块的 V_{REF} 端施加一个阶跃信号,同时记录各个环节的输入输出采样值,然后用Matlab语言编写的LIF及HLPF法程序进行参数辨识,其中改进HLPF法采用递推形式,考虑非零初始条件的影响,而HLPF法采用假设为零初始条件下的一次完成算法。递推形式的参数初始值都赋为0,并且引入遗忘因子,以降低老数据所提供的信息量,增加新数据的信息量,令 $\lambda = 0.98$ 。同时,取LIF法中的长度因子 $l = 60$ 。辨识结果如表所示,表1不仅给出LIF法的辨识结果,而且与HLPF法进行了对比,可以看到采用考虑了非零初始条件的改进HLPF法与LIF法都取得了好的辨识效果。表2只给出采用LIF法辨识得到的结果。

表1 励磁系统参数辨识结果1

Tab. 1 Estimation results of excitation system parameters 1

	综合放大环节		软反馈环节	
	K_A	T_A	T_F	K_F
LIF法 ($l = 60$)	299.999 6	0.200 2	1.499 8	0.030 0
改进HLPF法	299.995 3	0.204 1	1.500 0	0.030 0
HLPF法	292.103 9	0.201 9	1.423 8	0.028 9
参数真值	300	0.2	1.5	0.03

表2 励磁系统参数辨识结果2

Tab. 2 Estimation results of excitation system parameters 2

	励磁机时	电枢反应	整流器换相	饱和系数	
	间常数 T_E	系数 K_D	压降系数 K_C	C_1	C_2
LIF法 ($l = 60$)	0.599 8	0.380 2	0.200 0	—	—
参数真值	0.6	0.38	0.2	0.006 4	0.764 4

采用LIF法对式(21)的参数进行辨识时(S_E 取式(23)的前三项而忽略高阶项),系数 T_E 、 K_D 都可以取得好的辨识结果,依照文献[14]提出的方法求取饱和系数中的 C_1 、 C_2 ,通过仿真研究的结果看,求出的 C_1 、 C_2 并不可靠,文献[15]给出了在大扰动的情况下辨识DC1和AC1模型的励磁机饱和系数的

方法,而在小干扰的情况下是否能正确辨识出饱和系数还是值得商榷的。在整个仿真过程中,整流器一直工作在第一种换相状态,采用式(22)可以辨识得到 K_C 的值。

假如考虑噪声的影响,并将其影响都集中在输出的可加项 $v(t)$ 之中,即 $y(k) = x(k) + v(k)$, $v(k)$ 为零均值的独立分布高斯序列,分别取噪信比(N/S)为10%和20%,在这两种情况下采用LIF法辨识综合放大环节和软反馈环节的参数,辨识结果见表3。

表3 励磁系统参数辨识结果3(LIF法)

Tab. 3 Estimation results of excitation system parameters 3(LIF)

	综合放大环节		软反馈环节	
	K_A	T_A	T_F	K_F
N/S = 0%	299.999 6	0.200 2	1.499 8	0.030 0
N/S = 10%	299.280 7	0.199 3	1.489 6	0.029 8
N/S = 20%	298.893 2	0.194 4	1.485 2	0.029 7
参数真值	300	0.2	1.5	0.03

由表3可见,LIF法本身就具有较好的抵抗噪声能力,当噪声的影响较大时,考虑到参数估计的无偏一致性,可采用辅助变量法等来进行参数辨识。

4 结论

提出用一种新的连续时间辨识方法LIF法辨识同步发电机励磁系统参数,LIF法的优点在于辨识效果不受非零初始条件的影响,对选取的数据样本初值没有特殊的要求。而HLPF法在非零初始条件下得到的辨识结果会不同程度的受到影响。在仿真计算中,采用LIF法对用户自定义IEEEAC1A模型的参数进行了辨识,结果表明除励磁机饱和系数不能得到好的辨识效果外,其他系数的辨识效果都是令人满意的。针对实际情况下存在噪声的影响,文章进一步比较了噪信比分别为0%、10%、20%情况下的辨识效果,可以看出LIF法具有较好的抵抗噪声的能力。

参考文献:

- [1] 沈善德 (SHEN Sharr de). 电力系统辨识 (Identification of Power System) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1993.
- [2] Lennart L. System Identification: Theory for the User [M]. Beijing: Tsinghua University Press, Prentice Hall PTR, 2001.
- [3] 方崇智, 萧德云 (FANG Chong-zhi, XIAO De-yun). 过程辨识 (Process Identification) [M]. 北京: 清华大学出版社 (Beijing: Tsinghua University Press), 1988.

- [4] Sagara S, Zhao Z Y. Application of Digital Filtering Techniques[Z]. Sinha N K, Rao GP(Eds). Identification of Continuous-time Systems. Dordrecht: Kluwer, 1991.
- [5] Sagara S, Zhao Z Y. Numerical Integration Approach to on line Identification of Continuous-time Systems[J]. Automatica, 1990, 26(1):63-74.
- [6] Kowalczyk Z, Kozłowski J. Continuous-time Approaches to Identification of Continuous-time System [J]. Automatica, 2000, 36(8):1229-1235.
- [7] Sagara S, Zhao Z Y, Wada K. Identification of Continuous Systems Using Digital Low-pass Filters [J]. International Journal of Systems and Science, 1991, 22(7):1159-1176.
- [8] 王良, 沈善德, 朱守真, 等(WANG Liang, SHEN Shan-de, ZHU Shou-zhen, et al). 基于 EE 模型的励磁系统参数时域辨识法(A Method of Time Domain Identification Based on EE Model for the Excitation System Parameters) [J]. 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 26(8):25-28.
- [9] 朱守真, 沈善德, 焦连伟, 等(ZHU Shou-zhen, SHEN Shan-de, JIAO Lian-wei, et al). 建立大型同步发电机组励磁系统动态参数 (Establishing the Excitation System Dynamic Parameters for Large Synchronous Generators) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1997, 17(3):179-183.
- [10] Lion Ching tien, Chou Yr-shyong. Piecewise Linear Polynomial Function and Application to Analysis and Parameter Identification[J]. International Journal of System Science, 1987, 18(10):1919-1929.
- [11] 丁坚勇, 陈允平, 张承学(DING Jian-yong, CHEN Yur-ping, ZHANG Cheng-xue). 同步电机状态空间连续模型参数直接辨识法(State Space Continuous Model Parameters Direct Identification Method for Synchronous Generator) [J]. 湖北电力 (Hubei Electric Power), 2000, 24(3):1-4.
- [12] 邵伟, 徐政(SHAO Wei, XU Zheng). 励磁系统参数整定研究 (Study on Parameter Setting of Excitation Systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2002, 22(10):12-17.
- [13] 周泽昕, 吴中习(ZHOU Ze-xin, WU Zhong-xi). 建立自定义模型时的初值平衡问题 (Initial Value Balance Problem for Creating User-defined Model) [J]. 电网技术 (Power System Technology), 1996, 20(1):15-19.
- [14] Bhaskar R, Crow ML, Ludwig E. Nonlinear Parameter Estimation of Excitation Systems [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2000, 15(4):1225-1231.
- [15] WANG Jir-cheng, CHIANG Hsiao-dong, HUANG Chiang-tung, et al. Identification of Excitation System Models Based on On-line Digital Measurements[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10(3):1286-1293.

收稿日期: 2003-11-24; 修回日期: 2004-02-10

作者简介:

曹浩军(1979-),男,硕士研究生,主要从事电力系统自动化方面的研究; E-mail: hj-cao@163.com

张承学(1954-),男,博士生导师,主要从事电力系统稳定及自动化方面的研究;

单勇(1975-),男,硕士研究生,主要从事电力系统自动化方面的研究。

Identification of excitation system parameters based on LIF method

CAO Hao-jun, ZHANG Cheng-xue, SHAN Yong

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: A new continuous-time identification approach using the linear integral filter(LIF) is introduced to identify the parameters of excitation system. The linear integral filter can be used to eliminate completely the effect of the initial condition of the integratequation, that is to say, it does not require to identify the initial conditions under the non-zero initial conditions. In the simulation studies, IEEE ACIA excitation system is selected as an example, and parameter identification is performed with the employment of the LIF method.

Key words: excitation system; parameter identification; LIF method; LIF method

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告