

Prony 法在同步发电机参数辨识中应用

苏小林,周双喜

(清华大学 电机系电力系统国家重点实验室,北京 100084)

摘要: 提出在同步发电机短路试验中应用 Prony 法实现参数辨识。用 Prony 法对三相短路电流实测数据进行指数函数的最小二乘拟合,可确定同步发电机的大部分参数。同步发电机参数辨识分 4 步实现:确定 Prony 法中的拟合模型阶数、采样总数和采样间隔;对空载三相短路电流进行实测或录波;利用 Prony 法辨识三相短路电流中各分量对应的特征量;利用所得特征量辨识同步发电机参数。通过对算例发电机进行数值辨识,结果表明该方法的有效性。研究结果显示:取采样时间间隔约为 2 ms 时,辨识效果好;辨识精度与算法中拟合模型阶数、采样时间间隔和采样总数有关,并受信号中噪声的影响,需加以改进。

关键词: 同步发电机; Prony 算法; 参数辨识

中图分类号: TM 341

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)09-0001-04

0 引言

同步发电机是电力系统中最重要元件,其参数是电力系统电磁暂态和机电暂态分析和控制的基础数据。由于缺少准确的实际参数,目前所用的系统计算程序多使用工厂或手册的典型数据,或不得已采用简化数学模型。这种处理方法将造成计算结果与实际工况不符,严重影响计算的准确度和可信度。另外,发电机参数及其准确度对于电力系统各种控制系统设计和控制性能都有着直接的影响。因此,发电机参数的测试技术受到了工程技术人员与科研人员的高度重视。

发电机参数的传统实验测试和计算方法不仅繁琐、周期长,而且也很难保证所确定参数的准确度。利用在线辨识技术,如频域辨识法、现代最小二乘估计和卡尔曼滤波辨识等^[1-3],确定发电机参数可使该问题得到较好的解决。本文针对同步发电机参数模型的特点,提出利用 Prony 法辨识发电机参数。

Prony 法是用指数项线性组合拟合有限个按等间隔采样的信号,可以确定包含在信号中的频率、阻尼、相位和幅值,它是傅里叶分析的扩展。Prony 与最小二乘输入输出拟合试验比较结果表明 Prony 分析模式估计更精确^[4]。Prony 法已成功应用于电力系统振荡分析与控制、电力系统稳定器(PSS)参数调整与自适应控制和输电网络等值等方面^[4-8]。

本文阐述了发电机参数与三相短路电流的关系,提出了基于 Prony 法的同步发电机参数辨识算法,通过对三相短路电流的 Prony 分析,辨识出发电机参数,证实了本文方法的有效性。

1 发电机参数与三相短路电流

发电机参数主要包括 $x_d, x_q, x'_d, x''_d, x'_q, x''_q, \tau_a, \tau'_{d0}, \tau''_{d0}, \tau'_{d0}, \tau''_{d0}, \tau'_q, \tau''_q$ 等。这些参数中绝大部分可通过对三相短路电流的实测数据确定。因为在工程实际中,发电机检修后常需进行例行的空载短路试验。在试验中,只需用测试系统测试三相短路电流数据,即可进行在线或离线参数辨识。这种方法,无需向系统注入任何试验信号,因此非常方便、实用。

同步发电机三相短路时,定子短路电流(以 a 相电流为例)的表达式为^[9-10]

$$\begin{aligned} i_a = & \frac{E_{q|0|}}{x_d} \cos(t + \theta_0) + \\ & \left(\frac{E'_{q|0|}}{x'_d} - \frac{E_{q|0|}}{x'_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau'_d}} \cos(t + \theta_0) + \\ & \left(\frac{E''_{q|0|}}{x''_d} - \frac{E'_{q|0|}}{x''_d} \right) e^{-\frac{t}{\tau''_d}} \cos(t + \theta_0) + \\ & \frac{E''_{d|0|}}{x''_q} e^{-\frac{t}{\tau''_q}} \sin(t + \theta_0) - \\ & \frac{U_{|0|}}{2} \left(\frac{1}{x'_d} + \frac{1}{x''_q} \right) \cos(\delta_0 - \theta_0) e^{-\frac{t}{\tau_a}} - \\ & \frac{U_{|0|}}{2} \left(\frac{1}{x''_d} - \frac{1}{x'_q} \right) e^{-\frac{t}{\tau_a}} \cos(2t + \theta_0 + \delta_0) \end{aligned} \quad (1)$$

空载三相短路时,式(1)中 $E'_{q|0|} = E_{q|0|} = E_q|0| = U_{|0|}$, $\delta_0 = 0$, 且 $E''_{d|0|} = 0$ 。可见,只有 $x_d, x'_d, x''_d, x'_q, \tau_a, \tau'_d, \tau''_d$ 参数包含在 i_a 电流中,可对这些参数进行辨识。由上述辨识出的参数,应用式(2)即可计算出 τ'_{d0}, τ''_{d0} 。

$$\tau'_{d0} = \tau'_d \frac{x_d}{x'_d}, \quad \tau''_{d0} = \tau''_d \frac{x_d}{x''_d} \quad (2)$$

由式(1)可以看出,三相短路电流是由具有指数衰减项的直流分量、基频交流分量、2 倍基频交流分

量和幅值恒定的基频交流分量组成,属于指数型函数。对于三相短路电流的实测数据,若能采用指数函数线性组合进行曲线拟合,一定能取得很好的结果,这也是采用 Prony 法的出发点。

2 Prony 法

设被量测的采样值为 $x(k)$ ($k=1,2,\dots,N$),可采用式(3)所示的指数型函数的线性组合拟合。

$$x(k) = \sum_{i=1}^n A_i e^{j\theta_i} e^{(\alpha_i + j\omega_i)k\Delta t} \quad (3)$$

也可简写为

$$x(k) = \sum_{i=1}^n B_i z_i^k \quad (4)$$

式中 $B_i = A_i e^{j\theta_i}$ 也称为留数; $z_i = e^{(\alpha_i + j\omega_i)\Delta t}$; A_i 为幅值; θ_i 为初始相位; α_i 为衰减因子; ω_i 为角频率; Δt 为采样间隔。

采用 Prony 法对式(4)指数模型进行参数估计,需采用 4 个步骤。

a. 构造一个线性预测模型。 $x(k)$ 可由线性预测方程描述为

$$x(k) = a_1 x(k-1) + a_2 x(k-2) + \dots + a_n x(k-n) \quad (5)$$

由采样数据可得该线性预测模型的拟合模型为

$$\begin{bmatrix} x(n) & \dots & x(1) \\ \vdots & & \vdots \\ x(N-1) & \dots & x(N-n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(n+1) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} \quad (6)$$

求解上式可得到拟合系数 $a_1, a_2, \dots, a_n$ 。由于 $N > 2n$, 为保证数值计算的可靠,需采用基于奇异分解的方法求解。

b. 求线性预测模型的特征根。与线性预测模型对应的特征方程为

$$z^n - (a_1 z^{n-1} + a_2 z^{n-2} + \dots + a_n z^0) = 0 \quad (7)$$

求解上式可得特征方程的特征根 $z_i = e^{(\alpha_i + j\omega_i)\Delta t}$ ($i=1,2,\dots,n$)。

c. 留数计算。由式(4)可得:

$$\begin{bmatrix} 1 & \dots & 1 \\ z_1 & \dots & z_n \\ \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & \dots & z_n^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \\ \vdots \\ B_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(1) \\ x(2) \\ \vdots \\ x(N) \end{bmatrix} \quad (8)$$

利用最小二乘法求解上式得 B_i ($i=1,2,\dots,n$)。

d. 求解各分量的幅值、相位、频率和衰减因子。计算出反映各分量特征的量,计算式为

$$\begin{aligned} A_i &= |B_i| \\ \theta_i &= \arctan[\operatorname{Im}(B_i)/\operatorname{Re}(B_i)] \\ \alpha_i &= \ln|z_i|/\Delta t \\ \omega_i &= \arctan[\operatorname{Im}(z_i)/\operatorname{Re}(z_i)]/\Delta t \end{aligned} \quad i=1,2,\dots,n \quad (9)$$

3 在发电机参数辨识中的实现

在三相短路试验中用 Prony 法进行发电机参数辨识时,需首先确定 Prony 法的 3 个关键指标:拟合模型阶数 n 、采样总数 N 和采样间隔(或采样周期) Δt 。

由 i_a 计算式(1)可知, i_a 中包含 6 个量,在拟合模型中每个周期量对应 2 个分量。因此, Prony 法中所采用的模型阶数应不小于 9。为了保证拟合精度,要求采样总数 $N \gg 2n$ [11]。根据香农采样定律,选用的采样频率按大于信号中最高频率的 5~7 倍考虑。

利用 Prony 法确定出式(9)中的各量后,还要判定它们与式(1)中各分量的对应关系。最后,依此对应关系的算式,计算出发电机的各参数。

利用 Prony 法辨识同步发电机参数的步骤如下:

- 确定 Prony 法中的拟合模型阶数 n 、采样总数 N 和采样间隔 Δt ;
- 对空载三相短路电流进行实测或录波;
- 利用 Prony 法对三相短路电流中各分量对应的特征量进行辨识;
- 利用式(3)中辨识的特征量对同步发电机参数进行辨识。

4 算例研究

为了验证 Prony 法对发电机参数辨识的有效性,对一台参数已知的同步发电机进行仿真计算,将辨识的参数与实际参数进行比较,同时也对两者的响应曲线进行比较。在仿真中,设立了 2 种三相短路电流情况,情况 1 是不考虑谐波的参数辨识,情况 2 是考虑谐波存在的参数辨识。对每一种情况,将讨论拟合模型阶数 n 、采样总数 N 和采样间隔 Δt 对参数辨识的影响。

已知同步发电机参数(电抗为标么值)为 $x_d = 1.00$, $x_q = 0.60$, $x'_d = 0.30$, $x''_d = 0.21$, $x'_q = 0.31$, $\tau'_d = 1.643$ s, $\tau''_d = 0.337$ s, $\tau'_{d0} = 5.477$ s, $\tau''_{d0} = 0.48$ s, $\tau_a = 0.159$ s。假定 $\theta_0 = \pi/6$ 。在仿真中,首先用这些标准参数生成仿真用的三相短路电流,如图 1 所示(只给出了前 3 s 的波形)。再采用前面介绍的算法对该电流采样进行参数辨识。

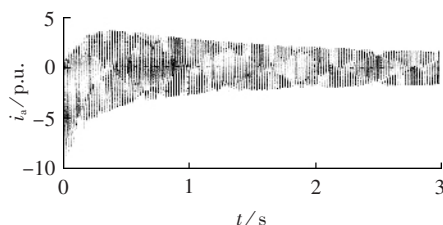


图 1 三相短路电流波形

Fig.1 Waveform of three-phase short-circuit currents

4.1 算例 1(无谐波条件)

在仿真研究中,首先确定模型阶数 n 。当选择的 n 小于待辨识信号的阶数时,信号中有的分量被遗漏。选择 n 过大时,一方面会产生一些无用分量,另一方面 Prony 法中的 2 个超定线性方程将出现秩亏缺。在研究中,对式(6)进行奇异分解,确定方程的秩,将其作为拟合模型阶数,最后得到 $n=9$ 。

选定采样时间间隔 $\Delta t = 1$ ms,采样点数分别为

100、200、500、1 000。在仿真中发现,当采样点数少(即采样时间跨度短)时,只对短路初期波形有很好的拟合效果,随着时间加长,其拟合效果变差。图 2(a)所示为 $\Delta t=1\text{ ms}$ 、 $N=100$ 在 1.99 s 附近的波形拟合图,拟合效果好;图 2(b)是在 3.14 s 附近的波形拟合(虚线表示),与原波形出现差别。

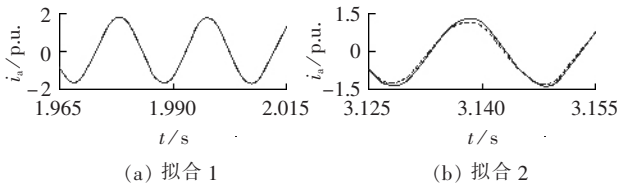


图 2 $\Delta t=1\text{ ms}$ 、 $N=100$ 的波形拟合图
Fig.2 Fitted waveforms with $\Delta t=1\text{ ms}$ and $N=100$

随着采样点的增加,波形拟合效果好的时间加长,如图 3 所示,它对应 $N=500$ 的波形图。但采样点数过多,短路初期的波形拟合将出现偏差。

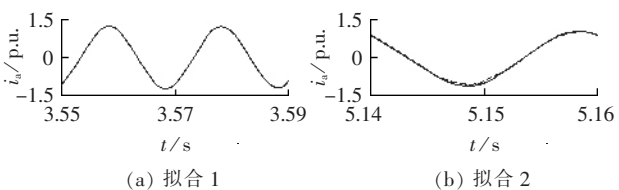


图 3 $\Delta t=1\text{ ms}$ 、 $N=500$ 的波形拟合图
Fig.3 Fitted waveforms with $\Delta t=1\text{ ms}$ and $N=500$

通过对三相短路电流中各分量的辨识结果进行分析可以发现,当采样点数少时,对强制基频周期分量和衰减较慢(以 τ_d' 衰减)的基频周期分量的辨识效果较差;随着采样点数的增加,各分量的辨识质量逐渐提高。

选定采样总数 $N=1\text{ 000}$,采样时间间隔分别为 0.1、0.5、0.7、0.8、0.9、2、3、5、7 ms。当 $\Delta t=5$ 或 7 ms 时,不能正确辨识出倍频周期分量。当 $\Delta t=0.5$ 或 0.1 ms 时,出现秩亏缺,并且对各分量辨识的效果较差。而 Δt 为 0.7、0.8、0.9 ms 时的情况接近 $\Delta t=1\text{ ms}$ 的情况。当 $\Delta t=2\text{ ms}$ 时,无论是波形拟合,还是三相短路电流中各分量的辨识都与原信号和分量一致,达到最佳辨识。选定 $\Delta t=2\text{ ms}$ 后,当采样总数分别取 100、200、500 和 1 000 时,辨识效果一直非常好;当采样总数小于 50 后,辨识效果开始下降。

4.2 算例 2(有谐波条件)

在式(1)所示的三相短路电流 i_a 基础上,叠加 3、5、7 次谐波,即

$$i_a' = i_a + 0.2 \cos(3\omega t + \pi/3) + 0.15 \cos(5\omega t + \pi/2) + 0.10 \cos(7\omega t + \pi/4)$$

仍取 $\Delta t=2\text{ ms}$ 、 $N=1\text{ 000}$,此时拟合模型的阶数被辨识为 $n=11$ 。由仿真结果看出,原电流信号中的高次谐波分量没有被辨识出来,其原因是该采样时

间间隔相对于高次谐波而言较长。但三相短路电流中的非周期分量、倍频分量和基频周期分量的辨识效果很好。在采样总数 $N>50$ 的情况下一直如此,表 1 给出了 $\Delta t=2\text{ ms}$ 、 $N=100$ 情况下所辨识的发电机参数,辨识精度很高。

表 1 标准参数与辨识参数比较
Tab.1 Contrast between standard and identified parameters

参数	标准值 /p.u.	辨识值 /p.u.	误差 /%	参数	标准值 /s	辨识值 /s	误差 /%
x_d	1.00	1.005 20	0.520	τ_d'	1.643	1.645 50	0.150
x_d'	0.30	0.300 01	0.003	τ_d''	0.337	0.337 01	0.003
x_d''	0.21	0.209 99	-0.005	τ_a	0.159	0.159 00	0
x_q''	0.31	0.309 97	-0.010	τ_{d0}'	5.477	5.513 30	0.660
				τ_{d0}''	0.480	0.481 48	0.308

当采样时间间隔减小时,拟合模型的阶数将增大,并且能辨识的谐波次数也增大。例如, $\Delta t=1\text{ ms}$ 时,能辨识出 3、5 次谐波,而 $\Delta t=0.5\text{ ms}$ 时,能辨识出 3、5、7 次。但 Δt 减小有使基频周期分量辨识质量下降的趋势,如在 $\Delta t=0.5\text{ ms}$ 时,辨识后的信号中缺少一个基频分量,并且其他基频周期分量辨识效果有所下降。

4.3 算例 3(实录波形)

对某 3 kW 同步电机实录波形,应用本文所提方法进行曲线拟合。由于缺乏该试验同步电机的标准参数作为对照,所以只是进行了曲线拟合及特征量提取。图 4 为同步电机空载降压情况下出口突然三相短路的 a 相短路电流实录波形。采样间隔 $\Delta t=2\text{ ms}$,数据长度 $N=200$,模型阶数 $n=9$,辨识出的各特征量列于表 2 中。

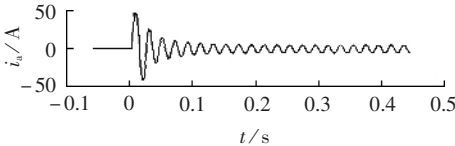


图 4 实录波形
Fig.4 The recorded waveform

表 2 实录波形的各特征量
Tab.2 Characteristic components corresponding to the recorded waveform

I/A	$\varepsilon/\text{s}^{-1}$	f/Hz	φ/rad
17.804	-7.343	49.970	-1.030
37.878	-80.950	49.709	-1.120
1.834	-68.850	101.460	0.797
1.090	-151.000	0	0
4.582	-0.005	50.230	-1.140

注: I 为电流幅值; ε 为衰减因子; f 为频率; φ 为初相。

由表 2 可见,Prony 法辨识出三相短路中的基频交流分量(次暂态、暂态、稳态分量)、直流分量和倍频分量,但辨识存在一定误差。通过对实录波形进行分析,发现信号中存在噪声干扰信号,对辨识结果的幅值和衰减因子有较大影响,这需要进一步解决。这些分量可用于电机参数辨识。

5 结论

通过算例仿真结果可以看出,当采样时间间隔 Δt 在2 ms左右时,利用Prony法可对三相短路电流中各分量的特征量进行有效辨识,从而可以很好地辨识出发电机有关参数。由于发电机三相短路电流信号可通过发电机三相短路试验测得,因此,该方法既方便又实用,可离线分析也可用于在线计算。但是,上述基本Prony法辨识精度与算法中拟合模型阶数、采样时间间隔和采样总数有关,并且受信号中的噪声影响,还需加以改进。

参考文献:

- [1] 沈善德. 电力系统辨识[M]. 北京:清华大学出版社,1993.
- [2] ZHU Shou-zhen, SHEN Shan-de, HAN Bao. Identification of parameters of synchronous machine by frequency response tests[C]//International Conference on Power System Technology, IEEE CSEE. Beijing, China: [s.n.], 1991: 861-865.
- [3] SUGIYAMA T. Measurements of synchronous machine parameter under operating condition[J]. IEEE Trans on PAS, 1982, 101(4): 235-238.
- [4] TRUDNOWSKI D J, DONNELLY M K, HAUER J F. Advances in the identification of transfer function models using Prony analysis [C]//Proceedings of the 1993 American Control Conference. San Francisco, USA: [s.n.], 1993: 1561-1562.
- [5] RUIZ-VEGA D, MESSINA A R, PAVELLA M. Online assessment and control of transient oscillations damping[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(2): 1038-1047.
- [6] TRUDNOWSKI D J, SMITH J R, PIERRE D A. An application of Prony method in PSS design for multimachine systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991, 6(1): 118-126.
- [7] QUINTERO J, VENKATASUBRAMANIAN V. A real-time wide-area control framework for mitigating small-signal instability in large electric power systems[C]//Proceedings of the 38th Hawaii

International Conference on System Sciences. Hawaii, USA: [s.n.], 2005: 1-10.

- [8] 苟北, 陈陈, 提兆旭. Prony算法在电力系统负荷动态模型辨识中的应用研究[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(1): 21-24.
GOU Bei, CHEN Chen, TI Zhao-xu. An application of Prony method in identification of power system dynamic load model[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(1): 21-24.
- [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.
- [10] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 2版. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [11] LOBOS T, REZMER J, KOGLIN H-J. Analysis of power system transients using wavelets and Prony method[C/CD]//IEEE Porto Power Tech Conference. Porto, Portugal: [s.n.], 2001.
- [12] 史维祥, 李天石, 郑滇. 系统辨识[M]. 北京: 机械工业出版社, 1989.
- [13] TRUDNOWSKI D J, JOHNSON J M, HAUER J F. Making Prony analysis more accurate using multiple signals[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(1): 226-231.
- [14] TAWFIK M M, MORCOS M M. On the use of Prony method to locate faults in loop systems by utilizing modal parameters of fault current[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 532-534.
- [15] LEE Joon-ho, KIM Hyo-tae. Selecting sampling interval of transient response for the improved Prony method[J]. IEEE Trans on Antennas and Propagation, 2003, 51(1): 74-77.
- [16] 徐东杰, 贺仁睦, 高海龙. 基于迭代Prony算法的传递函数辨识[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 40-43.
XU Dong-jie, HE Ren-mu, GAO Hai-long. Transfer function identification using iterative Prony method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 40-43.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

苏小林(1963-), 男, 四川宜宾人, 副教授, 博士研究生, 研究方向为电力系统稳定与系统辨识(E-mail: suxl03@mails.tsinghua.edu.cn);

周双喜(1941-), 男, 江苏武进人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力系统稳定。

Application of Prony method to parameter identification of synchronous generators

SU Xiao-lin, ZHOU Shuang-xi

(State Key Lab of Power System, Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The Prony method is presented to identify parameters of synchronous generators during their three-phase short-circuit tests. Prony method is used to fit the measured data of three-phase short-circuit currents with an exponential function based on the least square error, which can determine most parameters of the tested synchronous generator. The identification process includes four steps: determine the order of the fitting model, sample number and sample interval of Prony method; measure or record three-phase short-circuit currents without load; identify corresponding characteristic components in measured currents with Prony method; identify parameters of synchronous generators according to identified characteristic components. An example generator is identified and its results demonstrate the effectiveness of the presented method. The study shows that, higher accuracy can be achieved when sample interval is about 2 ms. The identification accuracy is related to the order of the fitting model, sample interval and sample number, and also affected by signal noise, which shows the method should be improved.

Key words: synchronous generator; Prony algorithm; parameter identification