

# 电力系统传递函数的通用 Prony 辨识算法

戚军, 江全元, 曹一家

(浙江大学电气工程学院, 浙江省 杭州市 310027)

## A General Prony Identification Algorithm for Power System Transfer Function

QI Jun, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, Zhejiang Province, China)

**ABSTRACT:** With interconnection of power grid, power system size becomes larger, and operation condition becomes more variable. Online identification of system model based on wide-area measurement data has become an important academic question for online analysis and wide-area control of power system. Considering the effect of initial states on system output, a general Prony identification algorithm of power system transfer function is brought forward, with selection principles of pumping signals and sampling parameters presented afterward. This algorithm permits the appearance of non-zero initial states and any type of pumping signals in the system to be identified, and could deal with multiple time-intervals situation. Identification of transfer function is carried out on two-area four-machine power system and new England test power system (NETPS). Simulation and analysis results show that this algorithm identifies initial states and transfer function accurately, moreover computation-time for identification is short and almost identical when system size changes. The general Prony identification algorithm is promising for online applications.

**KEY WORDS:** wide-area measurement system; power system model; system identification; Prony algorithm; transfer function

**摘要:** 全国电网互联使电力系统的规模越来越大、运行状态越来越多变, 研究基于广域测量数据的系统模型在线辨识方法成为电力系统在线分析及广域控制的重要理论问题。考虑初始状态对系统输出的影响, 提出一种电力系统传递函数的通用普朗尼(Prony)辨识方法, 同时给出激励信号和数据采样参数的选取原则。该算法允许待辨识系统初始状态非零, 可采用任意类型的激励信号, 并能综合处理多时段数据。辨识4机2区域系统和新英格兰系统的传递函数模型, 仿真分析结果表明, 通用Prony辨识方法能准确辨识初始状态和传

递函数, 计算速度快且几乎不随系统规模而变化, 辨识方法具备在线应用的潜力。

**关键词:** 广域测量系统; 电力系统模型; 系统辨识; Prony算法; 传递函数

## 0 引言

电力系统的规模越来越大, 结构越来越复杂, 对系统监测、分析和控制的要求也越来越高。广域测量系统(wide-area measurement system, WAMS)能提供许多宝贵的同步时间信号测量值, 与传统的SCADA系统互为补充, 为电力系统实时监测、分析和控制的实现提供了数据保障。系统辨识法利用实测数据可以快速得到系统模型参数, 避免了系统详细建模、高阶矩阵特征根求解, 非常适合大型电力系统在线建模分析。普朗尼(Prony)算法通过分析测量数据就可估计电力系统的振荡模态<sup>[1-5]</sup>, 包括振荡频率、阻尼、幅值和相位。Prony算法进一步拓展, 可辨识电力系统传递函数(transfer function, TF)模型, 适用范围与精度因算法而异<sup>[6-10]</sup>。根据辨识所得的电力系统振荡模态或传递函数模型, 配合极点配置、鲁棒控制、最优控制等方法可非常方便地设计低频振荡阻尼控制器<sup>[8-9, 11-14]</sup>。

目前已见诸文献的基于Prony算法的电力系统传递函数辨识法各有所长, 同时也存在着各自的局限。比如, 文献[6-9]中的算法适用于处于零初始状态或稳定状态的系统, 文献[6, 10]要求激励信号为一阶信号, 通常采用阶跃信号。然而, 实际电力系统经常会受到诸如负荷变化、机组启停、线路或设备故障等扰动, 如果没有激励信号输入, 系统的输出也是波动的; 当系统遭遇故障后, 波动的幅度可能非常大。由瞬间扰动引起的系统状态变化可视为扰动结束时系统的初始状态, 为获得准确的电力系

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(50507018, 50595414); 国家“十一·五”重点科技攻关项目(2006BAA02A01); 教育部科学研究重大项目(305008)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(50507018, 50595414); Key Project of the National 11th Five-year Research Programme of China(2006BAA02A01).

统传递函数在线辨识结果必须考虑系统的初始状态。此外,激励信号比较容易激发与自身频率相近的系统振荡模态,简单的一阶激励信号往往难以获得令人满意的激励效果,此时可考虑采用高阶激励信号及其组合。

本文首先提出一种通用的 Prony 传递函数辨识算法,允许选取任意类型的单时段/多时段复杂激励信号,适用于辨识非零初始状态下的电力系统传递函数;然后分析并总结激励信号和采样参数的选取原则;最后以 4 机 2 区域系统和新英格兰测试系统为例进行仿真实验,并与小信号分析结果进行比较。

## 1 通用传递函数辨识法基本原理

### 1.1 系统模型

通用的单输入单输出系统模型如图 1 所示,  $G(s)$  为系统传递函数模型,  $u(t)$  为系统激励信号,  $y(t)$  为系统输出,  $y_{ex}(t)$  为系统激励响应,  $y_0(t)$  为系统初始状态。  $u(t)$ 、 $y(t)$ 、 $y_{ex}(t)$  和  $y_0(t)$  的 Laplace 变换分别以  $U(s)$ 、 $Y(s)$ 、 $Y_{ex}(s)$  和  $Y_0(s)$  表示。  $G(s)$  和  $Y_0(s)$  的极点留数形式一般可表示为

$$Y_0(s) = \frac{A_0}{s} + \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{s - \lambda_i} \quad (1)$$

$$G(s) = R_0 + \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s - \lambda_i} \quad (2)$$

式中:  $n$  为传递函数的阶数;  $\lambda_i$  为系统特征根;  $R_i$  为传递函数的留数;  $A_i$  为初始状态的留数。假定  $\lambda_i$  各不相同并且以共轭复数对的形式出现,那么与之相对应的留数也应具有共轭复数对的形式。系统初始状态和传递函数辨识的目标是寻找  $\lambda_i$ 、 $R_i$ 、 $A_i$ ,  $i=1,2,\dots,n$  和  $n$  的估计值,使模型输出与实际系统输出尽可能接近。

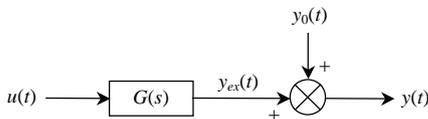


图 1 系统模型

Fig. 1 System model

$u(t)$  及其 Laplace 变换  $U(s)$  的一般形式为

$$\begin{cases} u(t) = \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^m c_{k,j} e^{s_j(t-D_{k-1})} [u(t-D_{k-1}) - u(t-D_k)] \\ U(s) = \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^m c_{k,j} \left[ \frac{e^{-sD_{k-1}} - e^{-sD_k + s_j(D_k - D_{k-1})}}{s - s_j} \right] \end{cases} \quad (3)$$

第  $k$  个输入时间区段可描述为  $t \in [D_{k-1}, D_k]$ , 不失一般性,  $D_0 = 0$ 。  $t \geq 0$  时存在  $(q+1)$  个时间区段, 其

中第 1 时段对应于  $D_0 \leq t < D_1$ , 第  $(q+1)$  时段对应于  $t \geq D_q$ , 令第 1、 $(q+1)$  时段  $u(t) = 0$ 。每 1 个时段内, 输入信号可表征为  $m$  个输入特征根  $s_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, m$ 。通过合理选择  $c_{k,j}$  的值可将  $s_j$  分配给特定时段; 合理选择  $s_j$  则可激起特定频率的振荡模式。

非零输入情况下, 系统输出  $Y(s)$  由初始状态  $Y_0(s)$  和激励响应  $Y_{ex}(s)$  共同组成:

$$Y(s) = Y_0(s) + Y_{ex}(s) \quad (4)$$

式中  $Y_{ex}(s) = R_0 U(s) + \sum_{i=1}^n R_i \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^m H_{i,j,k}(s)$ ,  $H_{i,j,k}(s) = c_{k,j} \left[ \frac{e^{-sD_{k-1}} - e^{-sD_k + s_j(D_k - D_{k-1})}}{(s - \lambda_i)(s - s_j)} \right]$ 。

经过 Laplace 逆变换, 系统输出  $y(t)$  可写成

$$y(t) = y_{ex}(t) + y_0(t) = R_0 u(t) + \sum_{i=1}^n R_i f_i(t) + A_0 + \sum_{i=1}^n A_i e^{\lambda_i t} \quad (5)$$

式中  $f_i(t) \equiv \sum_{k=1}^q \sum_{j=1}^m h_{i,j,k}(t)$ ,  $h_{i,j,k}(t)$  为  $H_{i,j,k}(s)$  的 Laplace 逆变换<sup>[15]</sup>。

### 1.2 Prony 辨识算法原理

根据 Prony 算法的基本原理, 第  $k$  时段的输出信号  $y(t)$  可表示为一组指数函数的加权线性组合:

$$y(t) = \sum_{i=1}^n B_i e^{\lambda_i t} + \sum_{j=1}^{n_k} B_{n+j} e^{s_j t} \quad (6)$$

式中:  $n_k$  为第  $k$  时段输入信号的特征根数目;  $B_i$  和  $B_{n+j}$  为输出信号  $y(t)$  的留数。令

$$z_i = e^{\lambda_i T_s}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$z_{n+j} = e^{s_j T_s}, \quad j = 1, 2, \dots, n_k \quad (8)$$

$$y_p = y(pT_s), \quad p = 1, 2, \dots, N_k \quad (9)$$

式中:  $T_s$  为采样周期;  $N_k$  为第  $k$  时段的采样点数。那么  $y_p$  的特征方程为

$$C_{k,y}(z^{-1}) = 1 - (\zeta_1 z^{-1} + \dots + \zeta_{n+n_k} z^{-n-n_k}) = C_G(z^{-1}) C_{k,u}(z^{-1}) \quad (10)$$

式中  $C_G(z^{-1})$  和  $C_{k,u}(z^{-1})$  分别为传递函数和激励信号的特征方程:

$$C_G(z^{-1}) = 1 - (a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}) = \prod_{i=1}^n (1 - e^{\lambda_i T_s} z^{-1}) \quad (11)$$

$$C_{k,u}(z^{-1}) = 1 - (a_{k,1} z^{-1} + \dots + a_{k,n_k} z^{-n_k}) = \prod_{j=1}^{n_k} (1 - e^{s_j T_s} z^{-1}) \quad (12)$$

当  $p > n + n_k$  时,  $y_p$  满足

$$y_p = \zeta_1 y_{p-1} + \zeta_2 y_{p-2} + \dots + \zeta_{n+n_k} y_{p-n-n_k} \quad (13)$$

令

$$q_p = y_p + a_{k,1} y_{p-1} + \dots + a_{k,n_k} y_{p-n_k} \quad (14)$$

则 $q_p$ 满足

$$q_p = a_1 q_{p-1} + a_2 q_{p-2} + \dots + a_n q_{p-n} \quad (15)$$

由此可见，通过重新构造输出信号 $q_p$ ，可写出关于传递函数特征方程 $C_G(z^{-1})$ 系数 $a_i$ 的线性方程(15)；利用最小二乘法求得 $a_i$ 后，就可获得传递函数的特征根 $\lambda_i$ 。

### 1.3 辨识步骤

基于上述系统模型和辨识原理，传递函数的通用 Prony 辨识算法可分解为以下 4 个环节：

1) 采用奇异值分解法<sup>[4]</sup>确定传递函数阶数 $n$ 。分别对每个时段的输出信号作 Prony 分析得到阶数 $m_k$ ；每个时段输入信号的阶数 $n_k$ 已知，那么这个时段传递函数的阶数估计值为 $n_k - m_k$ ；最后取所有时段中最大估计值作为传递函数阶数估计值 $n$ 。

2) 利用各时段激励信号 $u(t)$ 和系统输出 $y(t)$ 的采样数据，根据式(14)~(15)列写线性方程组，并用最小二乘法求解得到传递函数特征方程 $C_G$ 的系数 $a_i$ ， $i=1,2,\dots,n$ ；接着根据式(11)、(7)求解得到特征根 $\lambda_i$ ， $i=1,2,\dots,n$ 。

3) 用第 1 时段系统零输入响应 $y_0(t)$ 的采样数据，令式(5)中 $y_{ex}(s)=0$ ，用最小二乘法求得 $A_i$ ， $i=1,2,\dots,n$ 。估算其它时段系统初始状态响应 $y_0(t)$ ，并将其从系统输出 $y(t)$ 中减去，得系统激励响应 $y_{ex}(t)$ 。

4) 利用已辨识得到的系统传递函数特征根 $\lambda_i$ ， $i=1,2,\dots,n$ 和系统激励响应 $y_{ex}(t)$ ，令式(5)中 $y_0(t)=0$ ，用最小二乘法求解得到系统传递函数的留数 $R_i$ ， $i=1,2,\dots,n$ 。

传递函数辨识的完整过程如图 2 所示，除上述

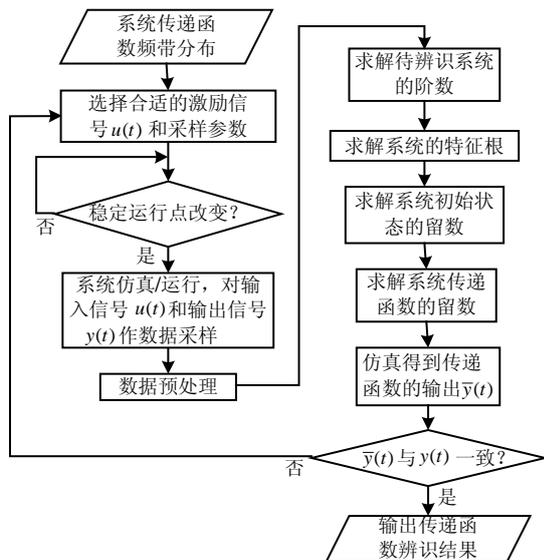


图 2 传递函数辨识流程图  
Fig. 2 Flowchart of TF identification

4 个核心环节，还应包括激励信号的选择、系统运行/仿真、数据预处理及采样等辅助环节。

## 2 参数的选择

### 2.1 激励信号

上述通用 Prony 传递函数辨识算法允许输入任意类型的激励信号及其组合。一阶信号是激励信号的基本形式，高阶信号可分解为多个一阶信号。下面将以一阶激励信号为例，分析激励信号对系统输出响应及传递函数辨识精度的影响。如图 1 所示的系统模型，输入激励信号 $u(t) = c_j e^{s_j t}$ ， $U(s) = \frac{c_j}{s - s_j}$ ；输出激励响应为 $Y_{ex}(s) = G(s) \cdot U(s)$ 。通过

Laplace 逆变换，当 $s_j \neq \lambda_i, i=1,2,\dots,n$ 时，有

$$y_{ex}(t) = (R_0 + \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{s_j - \lambda_i}) c_j e^{s_j t} + \sum_{i=1}^n \frac{c_j R_i}{\lambda_i - s_j} e^{\lambda_i t} \quad (16)$$

当 $s_j = \lambda_k, k \in [1,2,\dots,n]$ 时，有

$$y_{ex}(t) = (R_0 + R_k t + \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{R_i}{\lambda_k - \lambda_i}) c_j e^{\lambda_k t} + \sum_{i=1, i \neq k}^n \frac{c_j R_i}{\lambda_i - \lambda_k} e^{\lambda_i t} \quad (17)$$

由此可见，激励信号特征根 $s_j$ 与系统特征根 $\lambda_i$ 越接近，激励信号的幅值 $|c_j|$ 越大，那么激励响应 $y_{ex}(t)$ 中 $\lambda_i$ 模式的振荡幅值越大。一般而言，振荡幅值较大的模式可观性较好、辨识精度较高。

为获得较高的辨识精度，激励信号的特征根一般选择与系统主导特征根相近的值。考虑实际系统输出饱和及限幅环节的作用，激励信号的幅值 $|c_j|$ 不能过大，以免引起系统失稳、输出进入饱和/限幅区域。激励信号的具体取值可通过调整、试验后再确定。

### 2.2 数据采样

传递函数通用 Prony 辨识过程中，为获取准确的辨识结果，每个时段的数据采样都应遵循下面 3 个原则：

1) 对于周期为 $T$ 的信号，根据Nyquist采样定律，采样周期 $T_s < T/2$ 。采样周期接近 $T/2$ 时，单周期内采样数据点较少，辨识精度较低。

2) 数据窗宽度 $t_s$ 至少应包含 1 个完整信号周期。适当增加 $t_s$ 可改善辨识精度。

3) 总采样点数 $N = t_s / T_s$ ，它决定了方程数目。方程数必须大于待求变量数，但不宜过大，以免产生数值问题。

电力系统振荡按频率大小一般可划分为低频振荡(0.2~2.0 Hz)和次同步振荡(10~50 Hz), 相应于每种振荡都能找到合适的采样周期、数据窗宽度及采样点数。

### 3 仿真算例

#### 3.1 4机2区域系统

4机2区域系统是Ontario Hydro为研究区间振荡的基本特征而构建的<sup>[16]</sup>。系统中的4台发电机分2组分别位于区域1和区域2, 2个区域通过双回路长联络线连接, 2个负荷分别位于联络线的两端。正常运行时, 联络线有功功率从区域1流向区域2。如果没有控制装置的调节, 系统联络线上的有功功率容易出现低频振荡。传统电力系统一般采用电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)来抑制这种低频振荡, 以提高联络线的传输功率及系统的稳定性。

通过时域仿真可发现, 区间低频振荡主要表现在区域1与区域2之间的相对功角和角频率振荡以及联络线有功功率振荡。因此可考虑采用这些信号作为发电机励磁系统附加阻尼控制的反馈输入, 以此抑制区间低频振荡。本文以3#发电机组为例进行说明, 所有机组都采用高增益可控硅励磁系统<sup>[16]</sup>, 增益取200。电力系统传递函数的输入信号为3#发电机组励磁控制输入 $u$ , 输出信号为区域间相对功角 $\delta_r$ 。低频振荡的频率主要分布于[0.2 Hz, 2.0 Hz], 因此激励信号 $u(t)$ 选择低频信号(式(18)), 每个时段采样周期 $T_s$ 都取0.1 s, 数据窗宽度 $t_s$ 都取8 s, 总采样点数 $N$ 为80点。

$$u(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < 8 \\ 0.02 - 0.05e^{-0.1(t-8)} \cos(\pi(t-8)) + \\ 0.03 \cos(4\pi(t-8)), & 8 \leq t < 16 \\ 0, & 16 \leq t < 24 \end{cases} \quad (18)$$

根据上文所述流程, 将激励信号加入3#发电机组励磁系统控制输入端, 记录4机系统的输出信号 $\delta_r$ ; 然后辨识得到输出信号 $\delta_r$ 的初始状态, 以及输入 $u$ 至输出 $\delta_r$ 的传递函数的参数, 如表1所示。特征根 $(-0.0378 \pm 3.8694i)$ 表征了区间低频振荡模式, 阻尼较小衰减较慢; 特征根 $(-2.3519 \pm 13.3276i)$ 和 $(-4.9727 \pm 1.3586i)$ 对应快速衰减模式, 对系统振荡几乎没有影响。这意味着区间低频振荡是系统的主导振荡模式, 这与工程实践经验一致。

测试辨识所得初始状态和传递函数模型在激励信号作用下的响应, 并与实际系统输出进行比较

表1  $u \rightarrow \delta_r$ 的6阶传递函数及 $\delta_r$ 的初始状态

Tab. 1 6<sup>th</sup> order TF from  $u$  to  $\delta_r$  and initial state of  $\delta_r$

$\lambda_i$	$A_i$	$R_i$
	0.599 1	0.519 4+0.000 0i
-2.351 9-13.327 6i	-0.007 3-0.000 1i	-0.514 6+1.771 5i
-2.351 9+13.327 6i	-0.007 3+0.000 1i	-0.514 6-1.771 5i
-0.037 8+3.869 4i	-0.016 6-0.010 7i	-0.049 0-5.369 5i
-0.037 8-3.869 4i	-0.016 6+0.010 7i	-0.049 0+5.369 5i
-4.972 7+1.358 6i	0.025 8+0.100 8i	-6.458 0-9.729 9i
-4.972 7-1.358 6i	0.025 8-0.100 8i	-6.458 0+9.729 9i

如图3所示, 模型响应与实际系统输出曲线基本一致。系统初始状态非零, 因此零输入阶段(0~8 s)功角仍有波动。此外, 与小信号分析(small signal analysis, SSA)所得传递函数的奇异值频率响应作比较, 如图4所示, 在指定频率区间[0.2 Hz, 2.0 Hz]内, 两者的响应曲线也基本一致。因此, 可采用辨识所得模型作为4机2区域系统低振荡分析时的降阶模型。

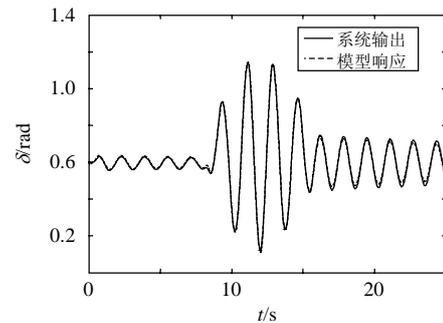


图3 系统输出与模型响应的比较

Fig. 3 Comparison of system output and model response

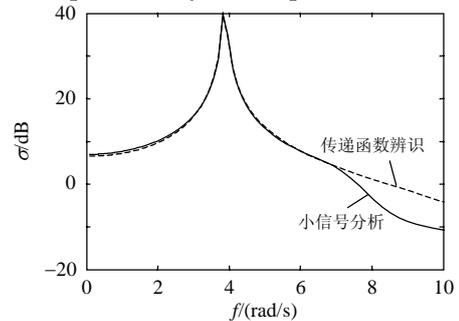


图4 传递函数辨识与小信号分析的奇异值频域响应比较  
Fig. 4 Comparison of singular value frequency responses between TF identification and SSA

#### 3.2 新英格兰测试系统

新英格兰系统(new England test power system, NETPS)的单线结构图如图5所示, 它由10台发电机组、39个节点和46条输电线路组成, 其中第10台发电机等价于与该系统相联的其它电力系统, 可看作是低阻抗、高惯性时间常数的发电机组。

在NETPS中, 母线15和母线16是几个低电压节点, 而连接母线14和15、16和17的2条线

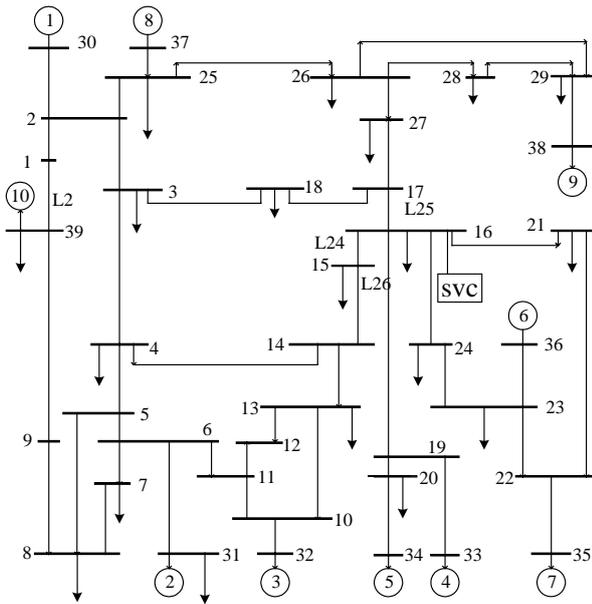


图 5 新英格兰测试系统单线图  
Fig. 5 Single-line diagram of NETPS

路恰好将整个测试系统分成 2 个独立区域，即这 2 条线路为区间联络线。为提高系统的电压稳定性，一般在母线 16 上安装有静止无功补偿装置(static var compensator, SVC)，SVC 控制信号取该母线的电压偏移<sup>[17]</sup>。但是在没有任何附加控制设备或措施的情况下，该系统阻尼明显不足，存在多种区间低频振荡模式，小信号分析结果如表 2 所示，根据留数模值大小判断模式 1 为主导模式，对应 10#机组与其它机组之间的振荡。为阻尼区间低频振荡，还需要在 SVC 引入反映区间低频振荡的反馈控制信号。根据模态可观性分析<sup>[18]</sup>结果，可选择区间相对功角  $\delta_i$  作为反馈信号输入 SVC。

表 2 区间低频振荡模式及其留数模值  
Tab. 2 Inter-area low-frequency oscillation modes and modules of corresponding residues

模式	特征根	阻尼	频率/Hz	留数模值
1	$-0.1817 \pm 4.0946i$	0.0443	0.6517	0.0359
2	$-0.2458 \pm 5.7700i$	0.0426	0.9183	0.0002
3	$-0.2764 \pm 6.4174i$	0.0430	1.0214	0.0005

传递函数的输入为 SVC 控制输入  $u_{SVC}$ ，输出为区间相对功角  $\delta_i$ 。激励信号类型与式(18)相同、但幅值加倍，每个时段采样周期  $T_s$  都取 0.05 s，数据窗宽度  $t_s$  都取 8 s，总采样点数  $N$  为 160 点。根据上文所述通用 Prony 辨识算法计算得到系统的初始状态和传递函数的参数如表 3 所示，系统存在低频振荡模式  $(-0.1634 \pm 6.2498i)$  和  $(-0.2096 \pm 4.0967i)$ ，后者的留数模值明显大于前者，因此后者为主导模式，辨识结果与小信号分析结果及模态可观性<sup>[18]</sup>

表 3  $u_{SVC} \rightarrow \delta_i$  的 9 阶传递函数及  $\delta_i$  的初始状态

Tab. 3 9<sup>th</sup> order TF from  $u_{SVC}$  to  $\delta_i$  and initial state of  $\delta_i$

$\lambda_i$	$A_i$	$R_i$
	-0.8319	-0.2734 - 0.0000i
-0.9581	0.0003	-1.2382 - 0.0000i
$-0.1634 \pm 6.2498i$	0.0001 + 0.0000i	-0.3786 + 0.4366i
$-0.1634 \pm 6.2498i$	0.0001 - 0.0000i	-0.3786 - 0.4366i
$-0.6352 \pm 15.6045i$	0.0001 + 0.0002i	0.3878 - 0.2054i
$-0.6352 \pm 15.6045i$	0.0001 - 0.0002i	0.3878 + 0.2054i
$-0.2096 \pm 4.0967i$	-0.0051 - 0.0163i	-1.0245 - 2.1834i
$-0.2096 \pm 4.0967i$	-0.0051 + 0.0163i	-1.0245 + 2.1834i
$-3.8238 \pm 2.6289i$	0.0046 + 0.0070i	3.3317 + 2.9840i
$-3.8238 \pm 2.6289i$	0.0046 - 0.0070i	3.3317 - 2.9840i

分析结果一致。

辨识高阶电力系统的传递函数模型，结果一般都是降阶模型，因此 NETPS 的多种低频振荡模式在传递函数模型中并不会都出现，留数较小的模式对传递函数特性的影响比较微弱，可能会被忽略，如表 3 所示辨识结果中，不再存在表 2 中的模式 2。

将激励信号输入辨识所得系统模型，比较模型响应与实际系统输出曲线，由图 6 可见，两者完全一致。此外，比较辨识所得传递函数与小信号分析所得传递函数的奇异值频率响应如图 7 所示，在低频振荡频率区间 [0.2 Hz, 2.0 Hz] 内，两者的响应曲线比较接近。因此辨识得到的系统模型可作为 NETPS 低频振荡分析的降阶模型。

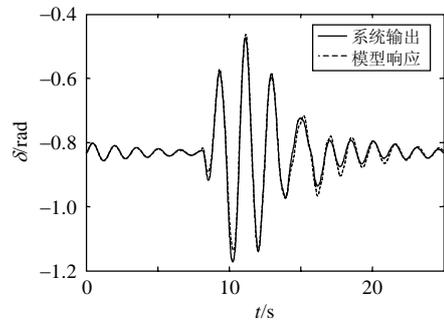


图 6 系统输出与模型响应的比较

Fig. 6 Comparison of system output and model response

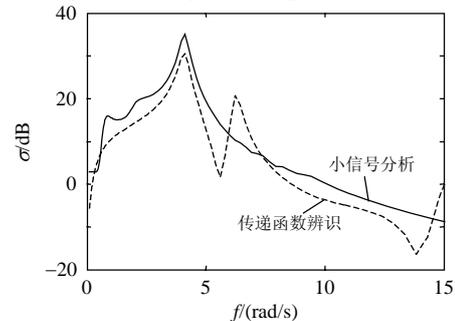


图 7 传递函数辨识与小信号分析的奇异值频域响应比较  
Fig. 7 Comparison of singular value frequency responses between TF identification and SSA

## 4 结论

本文提出了一种电力系统传递函数的通用 Prony 辨识算法, 并且分析了激励信号对辨识精度的影响, 给出了激励信号、采样周期、数据窗宽度等参数的选取原则。该方法不仅允许待辨识系统存在非零初始状态, 而且允许输入任意类型激励信号、能综合考虑多时段的激励与响应。电力系统仿真试验表明, 通用 Prony 传递函数辨识算法解除了对激励信号和系统初始状态的限制, 能快速而准确地辨识得到指定频率区间的电力系统传递函数降阶模型; 与小信号分析结果的比较更进一步证实了本文所提算法的有效性。

## 参考文献

- [1] Hauer J F, Demeure C J, Scharf L L. Initial results in Prony analysis of power system response signals[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(1): 80-89.
- [2] Huang Ying, Xu Zheng, Pan Wulue. A practical analysis method of low frequency oscillation for large power systems[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, San Francisco, USA, 2005: 1623-1629.
- [3] Ye Hua, Liu Yutian, Niu Xinsheng. Low frequency oscillation analysis and damping based on Prony method and sparse eigenvalue technique[C]. IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control, Florida, USA, 2006: 1006-1010.
- [4] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥, 等. 电力系统低频振荡在线辨识的改进 Prony 算法[J]. 清华大学学报: 自然科学报, 2004, 44(7): 883-887. Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Hu Zhixiang, et al. Improved Prony method for online identification of low-frequency oscillations in power systems[J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(7): 883-887(in Chinese).
- [5] 鞠平, 谢欢, 孟远景, 等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(22): 56-60. Ju Ping, Xie Huan, Meng Yuanjing, et al. Online identification of low-frequency oscillation based on wide-area measurements [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 56-60(in Chinese).
- [6] Smith J R, Fatehi F, Woods C S, et al. Transfer function identification in power system applications[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1993, 8(3): 1282-1290.
- [7] Dolan P S, Smith J R, Mittelstadt W A. Prony analysis and modeling of a TCSC under modulation control[C]. Proceedings of the 4th IEEE Conference on Control Applications, Seattle, USA, 1995: 239-245.
- [8] Amer H, Ali F, Azra H, et al. Practical robust PSS design through identification of low-order transfer functions[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(3): 1492-1500.
- [9] 肖晋宇, 谢小荣, 胡志祥, 等. 基于在线辨识的电力系统广域阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 22-27. Xiao Jinyu, Xie Xiaorong, Hu Zhixiang, et al. Power systems wide-area damping control based on online system identification [J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(23): 22-27(in Chinese).
- [10] 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 Dongjie, He Renmu, Gao Hailong. Transfer function identification using iterative Prony method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 40-43(in Chinese).
- [11] 郭春林, 童陆园. 基于在线辨识的可控串补自适应控制[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 7-12. Guo Chunlin, Tong Luyuan. Self-tuning phase-compensation control based on online identification of TCSC[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 7-12(in Chinese).
- [12] Trudnowski D J, Smith J R, Short T A, et al. An application of Prony method in PSS design for multimachine systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 118-126.
- [13] Daniel R V, Arturo R M, Mania P. Online assessment and control of transient oscillations damping[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(2): 1038-1047.
- [14] 芦晶晶, 郭剑, 田芳, 等. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-34. Lu Jingjing, Guo Jian, Tian Fang, et al. Power system oscillation mode analysis and parameter determination of PSS based on Prony method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 31-34(in Chinese).
- [15] Pierre D A, Smith J R, Trudnowski D J, et al. General formulation of a Prony based method for simultaneous identification of transfer functions and initial conditions[C]. Proceedings of the 31st Conference on Decision and Control, Tucson, USA, 1992: 1686-1691.
- [16] Kundur P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2001: 813-816.
- [17] 江全元, 张鹏翔, 曹一家. 计及反馈信号时滞影响的广域 FACTS 阻尼控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 82-88. Jiang Quanyuan, Zhang Pengxiang, Cao Yijia. Wide-area FACTS damping control in consideration of feedback signal's time delays [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 82-88(in Chinese).
- [18] Martins N, Lima L. Determination of suitable locations for power system stabilizers and static var compensators for damping electromechanical oscillations in large power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1990, 5(4): 1455-1469.



威军

收稿日期: 2007-12-12.

作者简介:

威军(1981—), 女, 博士研究生, 主要研究方向为计及广域测量信号时滞的电力系统阻尼控制, qijunzju@zju.edu.cn;

江全元(1975—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统稳定与控制, jqy@zju.edu.cn;

曹一家(1969—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统稳定与控制、智能优化算法以及电力系统信息化, yijiacao@zju.edu.cn.

(编辑 谷子)