

# 基于机组相关性的低频振荡多信号分类 Prony 分析

王辉, 苏小林

(山西大学 工程学院, 山西省 太原市 030013)

## Generation Unit Correlativity-Based Prony Analysis on Multi-Signal Classification of Low-Frequency Oscillation

WANG Hui, SU Xiaolin

(College of Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, Shanxi Province, China)

**ABSTRACT:** Power system signals from wide area measurement system (WAMS) can be divided into two categories, namely the similar signals such as the angles of all generation units and non-similar signals such as angle, angular velocity and active power and so on of one and the same generation unit. During the analysis on low-frequency oscillation, in order to avoid both numerical value submerging and cumulative error of sample function matrix, a multi signal classification-based Prony algorithm is proposed. For large-scale power system, according to correlation factors of generation units the correlation matrix is built and according to the built matrix the generation units are divided into groups by the  $\alpha$  decomposition method in graph theory, and in the unit group the similar and non-similar signals are analyzed by Prony algorithm to obtain oscillation information. Calculation results of EPRI-36 system show that the proposed method is effective.

**KEY WORDS:** wide area measurement system (WAMS); Prony algorithm; low-frequency oscillation;  $\alpha$  decomposition method

**摘要:** 电力系统广域量测信号可分为同类信号(如所有机组的功角)和非同类信号(同一机组的功角、角速度、有功功率等)。分析低频振荡时, 为避免数值淹没现象及样本函数矩阵的累积误差问题, 提出了多信号分类 Prony 算法。对于大规模电力系统, 根据机组相关因子建立相关矩阵, 并依据相关矩阵通过图论中的 $\alpha$ 分解法进行机组分群, 在机群中应用 Prony 算法对同类和非同类信号进行分析, 获取振荡模式信息。算例结果验证了该方法的有效性。

**关键词:** 广域测量系统; Prony 算法; 低频振荡;  $\alpha$ 分解法

## 0 引言

低频振荡是现代电力系统普遍存在的现象, 严重影响电力系统的安全稳定运行<sup>[1-2]</sup>。Prony 算法<sup>[3-4]</sup>为低频振荡分析的主要方法<sup>[5-12]</sup>, 并发展了许多改

进算法。文献[12]提出了用于低频振荡分析的改进多信号 Prony 算法, 首先利用求和方式将所有信号叠加在一起, 然后采用单信号 Prony 算法进行分析, 该算法并未考虑不同信号之间的差异、信号过多相加容易产生样本函数矩阵计算误差等问题, 而且系统规模较大时并非所有信号均能反映系统的振荡特性。为此, 本文在改进多信号 Prony 算法的基础上, 将广域测量系统获得的低频振荡信号进行分类, 同时对大规模电力系统根据机组相关性对机组进行分群, 进而对相关机群的低频振荡信号进行分类 Prony 分析, 通过分析结果可确定主导振荡模式。

## 1 多信号分类 Prony 算法

### 1.1 单信号 Prony 算法

传统单信号 Prony 算法通过  $p$  个指数型函数的线性组合对被测信号的采样值  $x(n)$  进行拟合, 拟合后信号为

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^p A_m e^{j\theta_m} e^{(a_m + j2\pi f_m)n\Delta t} \quad (1)$$

式中:  $A_m$ 、 $\theta_m$ 、 $a_m$ 、 $f_m$  为第  $m$  个采样值的振幅、相位、衰减因子、频率;  $\Delta t$  为采样间隔。

式(1)可简写为

$$\hat{x}(n) = \sum_{m=1}^p b_m z_m^n \quad (2)$$

式中:  $b_m = A_m e^{j\theta_m}$ ;  $z_m^n = e^{(a_m + j2\pi f_m)n\Delta t}$ 。

广域测量系统同一时刻可得到多个信号(如功角  $\delta$ 、角速度  $\omega$ 、机端电压  $U$ 、有功功率  $P$ )的采样值, 因不同信号存在差异, 按照文献[12]方法直接将被测信号相加会出现数值淹没现象, 而且多信号相加还会造成样本函数矩阵计算误差的问题。为提高 Prony 分析精度, 本文将广域测量信号分为同类

信号(如不同机组的功角 $\delta$ )和非同类信号(如同一机组的角速度 $\omega$ 、机端电压 $U$ ),根据不同信号的特点分类进行 Prony 分析。

### 1.2 同类多信号 Prony 算法

假设系统中有 $h$ 个同类信号,则同类信号 Prony 算法的具体步骤如下:

1) 对 $h$ 个同类信号进行预处理。

令 $x_k(n)$ 为第 $k(k=1,2,\dots,h)$ 个同类信号的第 $n$ 个采样值,则 $h$ 个同类信号的采样平均值为

$$\bar{x}(n) = \frac{1}{h} \sum_{k=1}^h x_k(n) \quad (3)$$

2) 构造平均样本函数矩阵<sup>[3]</sup>。

平均样本函数矩阵为

$$\bar{\mathbf{R}} = \begin{bmatrix} \bar{r}(1,0) & \bar{r}(1,1) & \cdots & \bar{r}(1,p_e) \\ \bar{r}(2,0) & \bar{r}(2,1) & \cdots & \bar{r}(2,p_e) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \bar{r}(p_e,0) & \bar{r}(p_e,1) & \cdots & \bar{r}(p_e,p_e) \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中:  $\bar{r}(i,j) = \sum_{n=p}^{N-1} \bar{x}(n-j)\bar{x}^*(n-i)$ ,  $N$  为采样点总数;  $p_e$  为算法预估阶数,为保证算法的快速性和准确性,一般取为  $N/2$ , 且  $p_e \gg p$ ,  $1 \leq i \leq p_e$ ,  $0 \leq j \leq p_e$ 。

3) 求得 $\bar{\mathbf{R}}$ 的阶数 $p$ 及自回归参数 $a_i$ 后,进一步求解特征多项式的根 $z_i (i=1,2,\dots,p)$ 。

$$1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_p z^{-p} = 0 \quad (5)$$

4) 由式(2)递推计算 $k$ 个同类信号的近似值 $\hat{x}_k(n)$ , 令

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_p \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_{k1} \\ b_{k2} \\ \vdots \\ b_{kp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}_k(0) \\ \hat{x}_k(1) \\ \vdots \\ \hat{x}_k(N-1) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中 $b_{ki}$ 为第 $k$ 个同类信号的第 $i$ 个分量。

利用式(6)可求得 $\mathbf{b}_k = [b_{k1}, \dots, b_{kp}]$ 。

5) 计算每个信号的振幅、相位、衰减因子和频率,具体计算方法详见文献[12]。

### 1.3 非同类多信号 Prony 算法

为了消除非同类信号之间的数值差异,本文将不同信号换算到统一数量级下再进行 Prony 分析,非同类信号的预处理步骤如下:

1) 假设系统中有 $q$ 个同类信号,求取第 $l (l=1,\dots,q)$ 个非同类信号的采样平均值

$$\bar{x}_l = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x_l(n) \quad (7)$$

2) 求取第 $l$ 个采样平均值与第1个采样平均值的比值 $D_l$ ,并将非同类信号的采样值进行换算。

$$D_l = \frac{\bar{x}_l}{\bar{x}_1} \quad (8)$$

$$x'_l(n) = \frac{1}{D_l} x_l(n) \quad (9)$$

式中 $x'_l(n)$ 为数值换算后的第 $l$ 个非同类信号的第 $n$ 个采样值。

3) 求取全部非同类信号的采样平均值 $\bar{x}(n)$ 。

$$\bar{x}(n) = \frac{1}{q} \sum_{l=1}^q x'_l(n) \quad (10)$$

预处理非同类信号后,再利用同类信号 Prony 算法的步骤2) —5) 即可求得非同类信号的振幅、相位、衰减因子和频率。

由以上分析可知,式(3)(10)可避免 Prony 算法因原始数据过大造成平均样本函数矩阵 $\bar{\mathbf{R}}$ 的计算困难和累积误差的问题,同时式(7)—(9)的处理能有效防止非同类信号相加运算时的信号湮没现象。

## 2 机组分群

### 2.1 相关矩阵

系统规模较大时,广域测量系统获取的信号较多,如果对所有信号进行分析,则会由于数据量过大影响 Prony 算法的稳定性,而且某些扰动下并非所有机组均参与振荡,可能只有少数的相关机组参与其中<sup>[1]</sup>,因此大系统下对 Prony 算法分析所用的信号进行有目的的选取是非常必要的。

本文从反映机组振荡强弱的模式能量和电力系统动态稳定分析中的相关因子出发,确定系统的相关矩阵,根据机组相关性应用图论方法<sup>[13-14]</sup>对相关矩阵进行处理,得到内部相关性较大的相关机群,从而为信号选取提供依据。

为描述机组相关性,需要引入能够表征发电机运行特性及反映机组间振荡关系的变量,为此本文选取机组的振荡能量 $\mathbf{E}(\mathbf{E}=[E_1, \dots, E_n]^T)$ 与发电机的角速度变化量 $\Delta\omega (\Delta\omega = [\Delta\omega_1, \dots, \Delta\omega_n]^T)$ 作为变量,并通过振荡模式 $\lambda(\lambda=[\lambda_1, \dots, \lambda_p]^T)$ 建立起两者之间的关系。

令第 $i$ 台发电机的振荡总能量为

$$E_i = \sum_{n=0}^{N-1} [\hat{x}_i(n)]^2 \quad (11)$$

第 $m$ 个振荡模式的模式能量为

$$\lambda_m = \sum_{n=0}^{N-1} (b_m z_m^n)^2 \quad (12)$$

则第  $m$  个振荡模式对第  $i$  台发电机振荡总能量的参与度为

$$c_{im} = \frac{\lambda_m}{E_i} \quad (13)$$

求得所有振荡模式、机组振荡能量及模式能量参与度后可得

$$\begin{bmatrix} E_1 \\ E_2 \\ \vdots \\ E_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} & \cdots & c_{1p} \\ c_{21} & c_{22} & \cdots & c_{2p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ c_{n1} & c_{n2} & \cdots & c_{np} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_p \end{bmatrix} \quad (14)$$

即

$$E = C\lambda \quad (15)$$

$$\text{设 } P = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{p1} & p_{p2} & \cdots & p_{pn} \end{bmatrix}, P \text{ 为参与因子矩}$$

阵,  $P$  的具体计算方法参见文献[1], 令  $\lambda_m = [p_{m1}, p_{m2}, \dots, p_{mp}] [\Delta\omega_1, \Delta\omega_2, \dots, \Delta\omega_n]^T$ , 则

$$\lambda = P\Delta\omega \quad (16)$$

将式(16)代入式(14)可得

$$E = CP\Delta\omega \quad (17)$$

令  $M$  为机组相关性矩阵

$$M = CP \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)可得

$$E = M\Delta\omega \quad (19)$$

式中  $m_{ij}$  为  $M$  中的元素, 定义广义相关因子为

$$m'_{ij} = m'_{ji} = \sqrt{m_{ij}^2 + m_{ji}^2} \quad (20)$$

则系统广义相关矩阵为

$$M' = \begin{bmatrix} m'_{11} & m'_{12} & \cdots & m'_{1n} \\ m'_{21} & m'_{22} & \cdots & m'_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ m'_{n1} & m'_{n2} & \cdots & m'_{nn} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$M'$  可反映系统中  $n$  台机组间的相关性,  $m'_{ij}$  反映了第  $i$  台机组与第  $j$  台机组的相关性。

## 2.2 相关机群

$m'_{ij}$  反映了第  $i$  台机组与第  $j$  台机组的相关性, 根据  $m'_{ij}$  可将所有机组分为不同机群, 本文利用图论中的  $\alpha$  分解法<sup>[14]</sup>进行机组分群, 具体步骤如下:

1) 格式化广义相关矩阵  $M'$ 。

确定  $m'_{\max}$  ( $m'_{\max}$  为  $M'$  中最大元素), 令  $m''_{ij} = m'_{ij} / m'_{\max}$ , 并将  $M'$  的下三角元素置 0, 则可得到格式化后的相关矩阵  $M''$ 。

2) 确定分群门槛值  $\alpha_i$ 。

将  $M''$  中的上三角元素按从小到大的顺序排

列, 得到  $(d_1, d_2), (d_2, d_3), \dots, (d_{k-1}, d_k)$  共  $k-1$  个区间,  $d_i$  为上三角元素 ( $i=1, 2, \dots, k$ ),  $k$  为上三角元素总数, 取  $\alpha_i = (d_i + d_{i+1})/2$  ( $i=1, 2, \dots, k-1$ )。

3) 约化矩阵  $M''$ , 进行机组分群。

令  $i=k-1$ , 若  $m''_{ij}$  大于  $\alpha_i$ , 则  $m''_{ij}$  置 1, 否则置 0。从  $M''$  第 1 个非零对角元素开始在该对角元素的全部右下角元素中寻找为 1 的元素, 直至没有非零元素为止, 则值为 1 的元素所在列代表的机组为同一机群。重复上述过程, 直至将系统划分为若干机群。

4) 机群确定后, 如不满足分群大小及相关性要求, 则令  $i=i-1$ , 另取  $\alpha_{i-1}$  重复步骤 3), 直到机组分群符合要求。

参与因子矩阵  $P$  反映系统模式与状态变量之间的关系, 其由系统固有结构决定。模式能量参与度矩阵  $C$  能够反映系统运行状态, 可由系统实时信号的 Prony 分析结果得到。由式(18)可知, 相关矩阵  $M$  由  $C$ 、 $P$  构成, 本文利用  $M$  实现机组分群,  $M$  既反映了系统固有特性, 又与运行状态相关, 能够准确反映系统机组间的相关性关系。

## 3 算法步骤

本文算法具体步骤如下:

- 1) 通过广域量测系统采集系统低频振荡信号。
- 2) 求解广义相关矩阵  $M'$ 。
- 3) 求得  $M'$  后, 应用  $\alpha$  分解法进行机组分群。
- 4) 在不同机群中应用 Prony 算法对该机群的同类型、非同类信号进行分析。
- 5) 根据 Prony 分析结果确定主导振荡模式。

## 4 算例分析

### 4.1 算例参数

本文选用 EPRI-36 系统<sup>[15]</sup>作为测试系统, 设所有信号均可在同一时刻获得, 并令发电机组 8 机端发生三相短路故障, 持续时间为 0.12 s, 应用电力系统分析综合程序(power system analysis software package, PSASP)进行暂态稳定分析, 计算时长为 15 s, 积分步长为 0.01 s, 采样频率为 20 Hz。

### 4.2 多信号分类 Prony 分析

选取功角信号进行 Prony 分析, 结果如表 1 所示, 其中  $\delta_{Gi-Gj}$  为机组  $i$  与机组  $j$  的功角之差。

由表 1 可知, 通过对各机组与机组 8 之间功角差的 Prony 分析, 可识别出频率约为 0.77、0.97 Hz 的主要振荡模式<sup>[15]</sup>。

表 1 单信号 Prony 分析结果

**Tab. 1 Analysis result of single-signal Prony analysis**

功角	振荡模式	幅值/(°)	频率/Hz	衰减因子	相位/rad
$\delta_{G1-G8}$	1	17.309 4	0.768 2	-0.039 9	1.199 1
	2	6.432 2	1.204 8	-4.885 5	4.934 9
$\delta_{G2-G8}$	1	11.348 9	0.767 6	-0.046 0	1.210 3
	2	9.375 5	1.035 9	-0.302 4	0.110 4
$\delta_{G3-G8}$	1	22.300 6	0.960 0	-0.350 2	4.759 2
	2	5.406 6	0.709 8	-1.117 3	5.464 5
$\delta_{G4-G8}$	1	5.724 0	0.770 0	-0.037 6	1.119 2
	2	11.363 8	0.976 1	-0.238 9	0.905 9
$\delta_{G5-G8}$	1	16.978 3	0.983 2	-0.273 5	1.530 0
	2	6.086 3	0.781 4	-0.123 7	1.339 4
$\delta_{G6-G8}$	1	4.810 2	0.837 9	-0.211 9	5.015 5
	2	17.618 4	1.824 7	-4.847 6	1.559 8
$\delta_{G7-G8}$	1	1.104 5	1.311 8	-0.885 5	1.282 4
	2	0.873 5	1.044 8	-1.161 4	0.974 8
	3	0.183 8	0.773 6	-0.068 5	4.720 9

采用第 1.2 节方法处理除机组 8 以外的其他 7 个机组的信号, 得到同类多信号  $\bar{U}$ 、 $\bar{P}$ 、 $\bar{\delta}$ 、 $\bar{\omega}$ , 再进行同类多信号 Prony 分析, 结果如表 2 所示。

表 2 同类多信号 Prony 分析结果

**Tab. 2 Analysis result of similar multi-signal Prony algorithm**

信号	振荡模式	幅值	频率/Hz	衰减因子	相位/rad
$\bar{U}$	1	0.017 3 pu	0.969 6	-0.254 3	0.988 1
	2	0.007 6 pu	0.774 2	-0.248 8	1.098 8
$\bar{P}$	1	0.176 3 pu	0.971 4	-0.739 3	0.634 0
	2	0.062 5 pu	0.761 7	-0.121 9	1.016 8
$\bar{\delta}$	1	5.637 8 °	0.773 2	-0.158 8	1.492 4
	2	45.958 4 °	0.090 8	-0.224 6	1.444 7
$\bar{\omega}$	1	0.001 0 pu	0.771 6	-0.044 7	6.179 0
	2	0.001 4 pu	2.316 9	-4.205 0	4.916 2

由表 2 可知, 同类多信号 Prony 分析也可识别出 2 个主导振荡模式。

采用第 1.3 节方法处理除机组 8 以外的其他机组的信号, 得到以单个机组为单位的非同类多信号, 令  $q=4$ , 机组  $i$  的非同类信号为  $\bar{x}_{Gi} = 0.25(U_{Gi} + P_{Gi} + \delta_{Gi} + \omega_{Gi})$ ,  $U_{Gi}$ 、 $P_{Gi}$ 、 $\delta_{Gi}$ 、 $\omega_{Gi}$  为机组  $i$  的机端电压、有功功率、功角、角速度信号。运用 Prony 算法分析该系统非同类多信号, 结果如表 3 所示。

表 3 非同类多信号 Prony 分析结果

**Tab. 3 Analysis result of non-similar multi-signal Prony algorithm**

信号	振荡模式	幅值/(°)	频率/Hz	衰减因子	相位/rad
$\bar{x}_{G1}$	1	56.041 7	0.085 2	-0.283 6	1.487 4
	2	15.120 6	0.775 0	-0.047 6	0.854 6
$\bar{x}_{G2}$	1	74.810 0	0.078 0	-0.236 0	5.185 8
	2	2.582 8	1.701 3	-0.327 7	5.878 1
$\bar{x}_{G3}$	1	16.086 1	0.987 4	-0.227 9	4.982 8
	2	8.900 9	0.778 4	-0.176 3	4.905 7
	3	33.128 9	0.088 9	-0.134 7	4.730 0
$\bar{x}_{G4}$	1	4.827 0	1.826 7	-0.402 0	1.254 3
	2	8.001 5	0.772 3	-0.087 6	4.821 1
	3	45.886 7	0.090 6	-0.230 4	1.380 1
$\bar{x}_{G5}$	1	13.411 6	1.122 8	-0.527 5	1.415 0
	2	8.503 7	0.781 4	-0.075 4	1.214 0
	3	35.427 0	0.089 8	-0.146 1	1.423 6
$\bar{x}_{G6}$	1	27.757 2	0.794 8	-0.114 0	0.030 9
	2	461.196 4	2.468 6	-4.717 8	0.790 3
$\bar{x}_{G7}$	1	15.164 9	0.792 7	-0.083 8	0.496 6
	2	90.992 1	0.073 2	-0.497 3	1.398 5

注: 该算例所有信号在预处理过程中已换算为功角信号。

由表 3 可知, 非同类信号 Prony 分析不仅可得到系统的主导振荡模式, 而且较同类信号 Prony 分析还得到了更多的局部模式, 分析结果更加全面。

由以上分析可知, 应用分类多信号 Prony 分析可提高分析结果的准确性和主导模式的辨识精度, 能够得到更全面的系统振荡模式。

### 4.3 机组分群后的分类 Prony 分析

采用第 2 节方法得到模式能量参与矩阵

$$C = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0108 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0002 & 0.0000 & 0.0403 & 0.0000 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0091 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0058 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0005 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0275 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0183 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0092 & 0.0644 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0088 & 0.0672 \end{bmatrix}$$

利用 PSASP 软件对系统进行小干扰分析, 得到 0.2~2.5 Hz 间反映系统低频振荡的模式, 计算系统的参与因子矩阵

$$P = \begin{bmatrix} 0.0000 & 0.0008 & 0.0014 & 0.0013 & 0.0127 & 0.4389 & 0.0001 & 0.0002 \\ 0.0001 & 0.0049 & 0.0047 & 0.0074 & 0.0309 & 0.4342 & 0.0006 & 0.0009 \\ 0.0182 & 0.4009 & 0.0047 & 0.0968 & 0.0007 & 0.0001 & 0.0001 & 0.0001 \\ 0.0090 & 0.0711 & 0.0241 & 0.3917 & 0.0193 & 0.0011 & 0.0053 & 0.0068 \\ 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.3106 & 0.2096 \\ 0.0003 & 0.0001 & 0.1297 & 0.0005 & 0.3827 & 0.0013 & 0.0048 & 0.0069 \\ 0.0245 & 0.0010 & 0.2421 & 0.0007 & 0.0334 & 0.0006 & 0.0899 & 0.1338 \\ 0.2303 & 0.0015 & 0.0357 & 0.0080 & 0.0263 & 0.0007 & 0.0788 & 0.1167 \end{bmatrix}$$

由式(18)~(21)计算相关矩阵  $M$ , 经过整理得到广义相关矩阵

$$M = \begin{bmatrix} 0.0035 & 0.0000 & 0.0031 & 0.0013 & 0.0063 & 0.0042 & 0.0151 & 0.0157 \\ 0 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0000 & 0.0001 & 0.0001 \\ 0 & 0 & 0.0143 & 0.0002 & 0.0023 & 0.0007 & 0.0063 & 0.0079 \\ 0 & 0 & 0 & 0.0001 & 0.0003 & 0.0001 & 0.0007 & 0.0009 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0037 & 0.0005 & 0.0030 & 0.0038 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0000 & 0.0014 & 0.0021 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0083 & 0.0107 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.0128 \end{bmatrix}$$

对  $M''$  约化后进行机组分群, 如表 4 所示。

由表 4 可知,  $\alpha$ 取最大值时, 机组间几乎没有耦合, 分群数量较多;  $\alpha$ 取最小值时, 所有机组为同一机群, 分群数量为 1。确定机群时应当兼顾机组间耦合和分群数量, 经经验分析, 选择  $\alpha = 0.0086$  时的分群结果( $\{1,5,7,8\}$ 、 $\{3,4,6\}$ 、 $\{2\}$ )。

分群后, 对各机组进行同类、非同类信号的 Prony 分析, 限于篇幅, 本文仅对机群  $\{1,5,7,8\}$  做角速度  $\omega$  的同类信号分析, 对机群  $\{3,4,6\}$  做功角  $\delta$  的

表 4 机组分群结果

Tab. 4 Result of generator unit clustering

$\alpha$	分群情况*	分群个数
0.981 7	{1,8} {2} {3} {4} {5} {6} {7}	7
0.605 2	{1,7,8} {2} {3} {4} {5} {6}	6
0.193 4	{1,3,7,8} {2} {4} {5} {6}	5
0.140 5	{1,3,5,7,8} {2} {4} {6}	4
0.008 6	{1,5,7,8} {3,4,6} {2}	3
0.003 8	{1,3,4,5,7,8} {2} {6}	3
0.001 5	{1,3,4,5,7,8} {2,6}	2
0.001 1	{1,3,4,5,6,7,8} {2}	2
0.000 8	{1,2,3,4,5,6,7,8}	1
0.000 3	{1,2,3,4,5,6,7,8}	1

注：{}表示同一机群。

同类信号分析，而对机群{2}做角速度 $\omega$ 、功角 $\delta$ 、机端电压 $U$ 、有功功率 $P$ 的非同类信号分析。

将所有机组角速度作为同类信号 $G$ 进行 Prony 分析，并用机群{1,5,7,8}角速度作为同类信号 $G_1$ 进行 Prony 分析，结果如表 5 所示。

表 5  $G$  与  $G_1$  的 Prony 分析结果

Tab. 5 Analysis result of  $G$  and  $G_1$

信号	振荡模式	幅值/pu	频率/Hz	衰减因子	相位/rad
$G$	1	0.001 4	2.316 9	-4.205 0	4.916 2
	2	0.001 0	0.771 6	-0.044 7	6.179 0
$G_1$	1	0.001 0	0.959 0	-0.323 2	0.323 8
	2	0.001 0	0.761 2	-0.037 9	0.663 1

由表 5 可知，利用分群后信号 $G_1$ 进行 Prony 分析后得到了频率约为 0.77、0.96 Hz 的主导振荡模式，而用信号 $G$ 进行分析时却未能得到频率约为 0.96 Hz 的主导振荡模式，其原因可能是因为信号相加时出现了数值湮没现象，造成某些模式不明显，无法显现，而采用分群后信号可避免该现象。

将所有机组的功角 $\delta$ 作为同类信号 $M$ 进行 Prony 分析，并用机群{3,4,6}中的功角 $\delta$ 作为同类信号 $M_1$ 进行 Prony 分析，结果如表 6 所示。

表 6  $M$  与  $M_1$  的 Prony 分析结果

Tab. 6 Analysis result of  $M$  and  $M_1$

信号	振荡模式	幅值/(°)	频率/Hz	衰减因子	相位/rad
$M$	1	3.155 9	0.782 6	-0.323 9	0.647 6
	2	30.580 4	0.088 7	-0.112 4	1.462 9
$M_1$	1	4.603 9	0.797 3	-0.082 7	6.114 0
	2	44.992 8	0.090 5	-0.206 6	1.333 3

由表 6 可知， $M$ 、 $M_1$ 的分析结果相差不多，但仿真分析中发现，若选用信号 $M$ 进行分析，易出现因样本函数矩阵过大而无法完成 Prony 分析的问题。

将机组 2 机端电压 $U$ 作为同类信号 $Q$ 进行 Prony 分析，并用机群{2}中的角速度 $\omega$ 、功角 $\delta$ 、机端电压 $U$ 、有功功率 $P$ 作为非同类信号 $Q_1$ 进行 Prony 分析，结果如表 7 所示。

由表 7 可知，如果仅用机端电压 $U$ 进行 Prony

表 7  $Q$  与  $Q_1$  的 Prony 分析结果

Tab. 7 Analysis result of  $Q$  and  $Q_1$

信号	振荡模式	幅值/pu	频率/Hz	衰减因子	相位/rad
$Q$	1	0.000 6	2.558 9	-3.029 5	5.343 9
	2	0.000 7	1.732 6	-0.295 4	5.921 7
$Q_1$	1	0.000 3	0.770 2	-0.139 1	0.481 2
	2	0.000 1	1.800 2	-0.685 1	1.517 4

注：该算例所有信号在预处理过程中已换算为角速度信号。

分析，由于端电压幅值变化较小、速度较快，未能得到主导振荡模式，而应用非同分类信号进行 Prony 分析可得到频率约为 0.77 Hz 的主导振荡模式，因此非同类信号 Prony 分析的振荡模式辨识效果较好。

由表 5—7 可知，由系统相关性角度对机组进行粗略分群处理后，在机群内进行分类信号 Prony 分析能够得到系统所关注的主导振荡模式，而比选用全系统信号进行 Prony 分析更简便，且结果更加完整，解决了大系统中的信号湮没及 Prony 算法中样本矩阵过大无法计算的问题，提高了 Prony 算法在大规模系统下的稳定性。

## 5 结论

本文利用机组间相关性将系统分成若干个机群，在机群内利用同类、非同类信号对低频振荡信号进行 Prony 分析，提高了算法精度，扩大了算法适用范围。由于在传统 Prony 分析算法的基础上加入了信号选取及预处理步骤，算法的时效性有所下降，下一步将研究改进算法处理速度的途径，使算法具有更高的时效性。

## 参考文献

- [1] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 260, 235-239, 256-257.
- [2] 朱方, 汤涌, 张东霞, 等. 我国交流互联电网动态稳定性的研究及解决策略[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 1-5.  
Zhu Fang, Tang Yong, Zhang Dongxia, et al. Study on dynamic stability problems of AC interconnected area power grids in China and their solutions[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 1-5(in Chinese).
- [3] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 1994: 120.
- [4] 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).
- [5] 常乃超, 兰洲, 甘德强, 等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.  
Chang Naichao, Lan Zhou, Gan Deqiang, et al. A survey on applications of wide-area measurement system in power system analysis and control[J]. Power System Technology, 2005, 29(10):

- 46-52(in Chinese).
- [6] 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, 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, 2004, 44(7): 883-887(in Chinese).
- [7] 郭成, 李群湛, 王德林. 互联电力系统低频振荡的广域 Prony 分析[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(5): 69-73.  
Guo Cheng, Li Qunzhan, Wang Delin. Wide-area Prony analysis of low frequency oscillation in interconnected power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(5): 69-73(in Chinese).
- [8] 邓集祥, 涂进, 陈武晖. 大干扰下主导低频振荡模式的鉴别[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 36-41.  
Deng Jixiang, Tu Jin, Chen Wuhui. Identification of critical low frequency oscillation mode in large disturbances[J]. Power System Technology, 2007, 31(7): 36-41(in Chinese).
- [9] 李大虎, 曹一家. 基于模糊滤波和 Prony 算法的低频振荡模式在线辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 14-19.  
Li Dahu, Cao Yijia. An online identification method for power system low-frequency oscillation based on fuzzy filtering and Prony algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 14-19(in Chinese).
- [10] 黄莹, 徐政, 潘武略. 基于 PSS / E 的华东电网低频振荡分析方法[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 11-17.  
Huang Ying, Xu Zheng, Pan Wulue. Analysis method for low frequency oscillation in East China Power Grid based on power system simulation software PSS/E[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 11-17(in Chinese).
- [11] 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.
- [12] 马燕峰, 赵书强, 刘森, 等. 基于改进多信号 Prony 算法的低频振荡在线辨识[J]. 电网技术, 2007, 31(15): 44-49.  
Ma Yanfeng, Zhao Shuqiang, Liu Sen, et al. Online identification of low-Frequency oscillations based on improved multi-signal Prony algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(15): 44-49(in Chinese).
- [13] Zaborszky J, Wang K W, Huang G M, et al. A clustered dynamic model for a class of linear autonomous systems using simple enumerative sorting[J]. IEEE Trans on Circuits and Systems, 1982, 29(11): 747-757.
- [14] 吕岩岩, 方鹤飞, 刘君华, 等. 电力系统电压与无功控制分区的改进[J]. 电工技术, 2006(2): 39-41.  
Lü Yanyan, Fang Gefei, Liu Junhua, et al. The amelioration in the course of reactive power and voltage control[J]. Electric Engineering, 2006(2): 39-41(in Chinese).
- [15] 鞠平, 代飞. 电力系统广域测量技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 112.



王辉

收稿日期: 2010-12-26。

作者简介:

王辉(1984), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统运行控制研究, E-mail: wanghui7602@126.com;

苏小林(1963), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统稳定分析与控制研究。

(编辑 徐梅)