

TLS-ESPRIT 算法在低频振荡分析中的应用

张 静, 徐 政, 王 峰, 常 勇

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

摘要:提出了一种新的电力系统低频振荡模式辨识方法,即基于总体最小二乘法-旋转不变技术的信号参数估计(TLS-ESPRIT)算法。该算法是一种基于子空间的高分辨率信号分析方法,直接以测量数据构成的数据矩阵为基础,把信号空间分解为信号子空间和噪声子空间,能够高精度地辨识电力系统低频振荡的模式,进而可以为设计阻尼控制器提供依据。文中首先简要介绍了 TLS-ESPRIT 算法的基本理论,然后通过合成信号、4 机 2 区域系统和新英格兰 10 机 39 节点系统 3 个算例,验证了该算法的正确性和有效性,对实现低频振荡在线/离线监测具有应用价值。

关键词:低频振荡; 总体最小二乘法; TLS-ESPRIT 算法; 高分辨率; 子空间

中图分类号: TM712

0 引言

低频振荡现象是电力系统稳定运行中备受关注的重要问题之一。特征值分析法^[1-2]是研究电力系统低频振荡的一种经典方法,它在工作点附近对系统进行线性化处理,形成系统状态方程矩阵,进而求取特征值。由于特征值分析方法的局限性,目前还不能满足大型互联电网在线分析的需要。Prony 及其改进方法^[3-6]是一种模态参数辨识的时域方法,近年来被广泛应用于分析电力系统低频振荡和控制器参数优化等场合。Prony 算法对噪声比较敏感^[7],这是因为 Prony 是一种基于多项式的算法,先通过各种方法求得观测数据满足的多项式,然后再通过求解多项式的根来辨识低频振荡的频率、阻尼等信息。在求取多项式系数时,噪声对参数辨识的精度影响较大。为了抑制噪声的影响,通常采用辅助的滤波、去噪等环节或者通过增加模型的阶数来实现,增加了算法的复杂度和计算代价。HHT(Hilbert-Huang transform)方法^[8]可以处理非线性、非平稳的信号,但是由经验模态分解得到的固有模态函数分量的实际物理意义需要进一步研究。文献^[7]使用小波脊算法处理时变振荡信号有重要意义,但在提取多频率成分信号时存在分辨率不高的问题^[8]。

本文提出了一种基于总体最小二乘(TLS——total least squares)法和旋转不变技术的信号参数估计(ESPRIT——estimation of signal parameters via rotational invariance techniques)算

法^[9-12]的电力系统低频振荡特性辨识新方法,下文简称 TLS-ESPRIT 算法。类似 Prony 算法,此算法可利用电力系统测量数据或者时域仿真数据分析电力系统的低频振荡问题,不受电网规模的限制,克服了传统特征值分析法的局限性。二者都认为受到小的扰动后,电力系统可看做在工作点上的线性化系统,因此振荡信号可以用一系列指数函数的线性组合来拟合,通过振荡信号来辨识系统低频振荡信息。

1 TLS-ESPRIT 算法基本原理

ESPRIT 算法最早由 Roy 等人提出^[9-12]。ESPRIT 算法及其改进算法是一类基于子空间技术的信号参数估计算法,可处理稳态信号,也可以用于非稳态信号,避免了最大似然法、最大熵法和多重信号分类等方法固有的、在整个频域上的搜索,提高了计算效率。TLS-ESPRIT 是 ESPRIT 的改进算法,作为谐波恢复、振荡衰减正弦信号参数估计的有效工具,目前已被广泛应用于雷达阵列信号、语音信号、生物信号处理等场合^[11];近年来也被引入到电力系统中,应用于谐波和间谐波高精度检测^[13]、暂态信号分解^[14-15]、分布式电源解列控制^[16]等场合。

设振荡信号 $x(n)$ 可以表示为一系列幅值按指数规律变化的正弦信号与白噪声的组合,在采样时刻 n ,其表达式如下:

$$x(n) = \sum_{p=1}^P a_p e^{j\phi_p} e^{(-\sigma_p + j\omega_p)nT_s} + w(n) \quad (1)$$

式中: T_s 为采样周期;由于采样信号通常为实信号,模型阶数 P 通常为信号实际含有的实正弦分量个数的 2 倍; $a_p, \phi_p, \omega_p, \sigma_p$ 分别是第 p 个衰减分量的幅值、初始相位、角频率和衰减系数; f_p 为第 p 个衰减

分量的频率, $f_p = \omega_p / (2\pi)$; w 是均值为 0 的白噪声。

令 $c_p = a_p e^{j\theta_p}$, $z_p = e^{(-\sigma_p + j\omega_p)T_s}$, 则式(1)可简写为:

$$x(n) = \sum_{p=1}^P c_p z_p^n + w(n) \quad (2)$$

式中: z_p 称为信号极点。

定义向量 $\mathbf{x}(n) = [x(n), x(n+1), \dots, x(n+M-1)]^T$, 其中 $M > P$, 则

$$\mathbf{x}(n) = \sum_{p=1}^P c_p \boldsymbol{\tau}_M(z_p) z_p^n + \mathbf{w}(n) = \mathbf{\Gamma}_M \boldsymbol{\Phi}^n \mathbf{c} + \mathbf{w}(n) = \mathbf{S}(n) + \mathbf{w}(n) \quad (3)$$

式中:

$$\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_P]^T$$

$$\boldsymbol{\Phi} = \text{diag}(z_1, z_2, \dots, z_P)$$

$$\boldsymbol{\tau}_M(z_i) = [1, z_i, \dots, z_i^{M-1}]^T$$

$$\mathbf{\Gamma}_M = [\boldsymbol{\tau}_M(z_1), \boldsymbol{\tau}_M(z_2), \dots, \boldsymbol{\tau}_M(z_P)]$$

$$\mathbf{w}(n) = [w(n), w(n+1), \dots, w(n+M-1)]^T$$

由式(3)可以发现: z_p ($p=1, 2, \dots, P$) 确定了信号中各个分量的频率和阻尼系数, 完全决定了 $\boldsymbol{\Phi}$, 因而可以设法通过 $\boldsymbol{\Phi}$ 来间接求取信号极点, 进而获得各信号分量的频率和阻尼系数等参数。 $\boldsymbol{\Phi}$ 也被称为旋转算子。

为了表述方便, 规定符号 $\uparrow, \downarrow$ 分别表示矩阵删除第 1 行和最后 1 行后得到的新矩阵。例如: $\mathbf{S}^\downarrow$ 表示矩阵 $\mathbf{S}$ 删除最后 1 行后得到的新矩阵, $\mathbf{S}^\uparrow$ 表示矩阵 $\mathbf{S}$ 删除第 1 行后得到的新矩阵。

$$\mathbf{S}^\downarrow = \mathbf{\Gamma}_{M-1} \boldsymbol{\Phi}^n \mathbf{c} = \mathbf{J}_1 \mathbf{c} \quad (4)$$

$$\mathbf{S}^\uparrow = \mathbf{\Gamma}_{M-1} \boldsymbol{\Phi}^{n+1} \mathbf{c} = \mathbf{J}_2 \mathbf{c} \quad (5)$$

$$\mathbf{J}_2 = \mathbf{J}_1 \boldsymbol{\Phi} \quad (6)$$

$\mathbf{J}_1, \mathbf{J}_2$ 的列向量张成 2 个通过 $\boldsymbol{\Phi}$ 相互关联的空间。为了实现从被噪声污染的实测数据或者时域仿真数据中估计出信号的参数, TLS-ESPRIT 算法有不同的实现方式, 如首先根据观测数据求取信号的自相关矩阵, 文献[14-16]等采用的就是此方式。本文将直接根据 Hankel 数据矩阵来求取信号参数^[11], 检测系统低频振荡主导模式, 避免求取信号的自相关矩阵, 使计算更加高效、简洁、直观。

根据观测数据序列 $x(0), x(1), \dots, x(N-1)$ 构造 Hankel 数据矩阵:

$$\mathbf{X} = [\mathbf{x}(0), \mathbf{x}(1), \dots, \mathbf{x}(L-1)]^T = \begin{bmatrix} x(0) & x(1) & \cdots & x(M-1) \\ x(1) & x(2) & \cdots & x(M) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x(L-1) & x(L) & \cdots & x(N-1) \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: $L > P; M > P; L+M-1=N$ 。

对矩阵 $\mathbf{X}$ 进行奇异值分解:

$$\mathbf{X}^{\text{svd}} = \mathbf{U} \boldsymbol{\Sigma} \mathbf{V}^H = [\mathbf{U}_s, \mathbf{U}_n] \begin{bmatrix} \boldsymbol{\Sigma}_s & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \boldsymbol{\Sigma}_n \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_s^H \\ \mathbf{V}_n^H \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: $^{\text{svd}}$ 表示奇异值分解; 上标 H 表示共轭转置; $\mathbf{U}^H \mathbf{U} = \mathbf{I}; \mathbf{V}^H \mathbf{V} = \mathbf{I}; \mathbf{U} \in \mathbb{C}^{L \times L}; \mathbf{V} \in \mathbb{C}^{M \times M}; \boldsymbol{\Sigma} \in \mathbb{R}^{L \times M}$, 是对角阵, 对角元素为矩阵 $\mathbf{X}$ 的奇异值 $\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_P, \xi_{P+1}, \dots, \xi_{\max(L, M)}$ 的降序排列; $\mathbf{V}_s$ 与 $\mathbf{V}_n$ 分别对应信号子空间和噪声子空间。

当信号仅由 P 个复正弦信号分量叠加而成时, Hankel 数据矩阵的秩为 P , 此时 $\xi_1 > \xi_2 > \dots > \xi_P > \xi_{P+1} = \xi_{P+2} = \dots = \xi_{\max(L, M)} = 0$, 但是当信号被噪声污染时, 按照式(7)构造的矩阵是满秩的, 所有的奇异值都不等于 0。为了从噪声污染的采样数据中估计出信号参数, 可以把 $\mathbf{V}$ 分成 2 部分, 即 $\mathbf{V} = [\mathbf{V}_s, \mathbf{V}_n]$, $\mathbf{V}_s$ 的列向量是对应于矩阵 $\mathbf{X}$ 的幅值最大的 P 个奇异值的特征向量; 因为 $\mathbf{V}_s$ 和 $\mathbf{\Gamma}_M$ 的列向量张成相同的信号子空间, 故存在可逆矩阵 $\mathbf{T}$, 使得 $\mathbf{\Gamma}_M = \mathbf{V}_s \mathbf{T}$ 。

令 $\mathbf{V}_1 = \mathbf{V}_s^\downarrow, \mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_s^\uparrow$, 类似式(6), 存在可逆矩阵 $\boldsymbol{\Psi}$, 使得:

$$\mathbf{V}_2 = \mathbf{V}_1 \boldsymbol{\Psi} \quad (9)$$

考虑到测量噪声及干扰误差等因素, $\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2$ 分别存在误差 $\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2$, 式(9)可以改写为:

$$\mathbf{V}_2 + \mathbf{E}_2 = (\mathbf{V}_1 + \mathbf{E}_1) \boldsymbol{\Psi} \quad (10)$$

TLS 方法的思想是^[17]: 寻求 $\boldsymbol{\Psi}$ 的最优解使得式(10)成立, 同时误差矩阵 $\mathbf{E}_1$ 和 $\mathbf{E}_2$ 的总体误差 $\|\mathbf{E}_1, \mathbf{E}_2\|$ 最小。这可以通过如下步骤实现:

1) 构造矩阵 $[\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2]$, 并进行奇异值分解(SVD), $[\mathbf{V}_1, \mathbf{V}_2] = \tilde{\mathbf{U}} \tilde{\boldsymbol{\Sigma}} \tilde{\mathbf{V}}$, 其中, $\tilde{\mathbf{V}} \in \mathbb{C}^{2P \times 2P}$ 。

2) 把 $\tilde{\mathbf{V}}$ 分为 4 个 $P \times P$ 的矩阵, 即

$$\tilde{\mathbf{V}} = \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{V}}_{11} & \tilde{\mathbf{V}}_{12} \\ \tilde{\mathbf{V}}_{21} & \tilde{\mathbf{V}}_{22} \end{bmatrix}$$

则 $\boldsymbol{\Psi}_{\text{tls}} = -\tilde{\mathbf{V}}_{12} \tilde{\mathbf{V}}_{22}^{-1}$ 。

3) 求取 $\boldsymbol{\Psi}_{\text{tls}}$ 的特征值 λ_p ($p=1, 2, \dots, P$)。

4) 估计信号中各分量的频率、衰减系数和阻尼比:

$$\begin{cases} \omega_p = \frac{\arg \lambda_p}{T_s} \\ \sigma_p = -\frac{\ln |\lambda_p|}{T_s} \\ \zeta_p = \frac{\sigma_p}{\sqrt{\sigma_p^2 + \omega_p^2}} \end{cases} \quad (11)$$

在求得信号中各分量的频率和衰减系数后, 进而可以通过最小二乘法求得幅值和初始相角信息。考察 N 点采样信号, 有

$$\mathbf{Y} = \boldsymbol{\lambda} \mathbf{c} \quad (12)$$

式中:

$$\mathbf{Y} = [x(0), x(1), \dots, x(N-1)]^T$$

$$\mathbf{c} = [c_1, c_2, \dots, c_P]^T$$

$$\lambda = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \lambda_1 & \lambda_2 & \dots & \lambda_P \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \lambda_1^{N-1} & \lambda_2^{N-1} & \dots & \lambda_P^{N-1} \end{bmatrix}$$

使用最小二乘法可得到方程(12)的解:

$$\mathbf{c} = (\lambda^H \lambda)^{-1} \lambda^H \mathbf{Y} \quad (13)$$

信号中各个分量的幅值和相位为: $a_p = 2|c_p|$,

$\phi_p = \arg c_p$ 。

2 基于 TLS-ESPRIT 算法的低频振荡模式辨识

电力系统的低频振荡分析方法,如特征值法,通常需要比较详细的系统模型,其中负荷模型和参数对分析的结果影响比较大^[1,18],为了提高分析的精度,需要比较精确的负荷模型和参数。在未知系统模型的情况下,TLS-ESPRIT 算法可以根据系统实际测量数据来辨识系统低频振荡的主导模式。此方法还可以根据机电暂态仿真程序的输出数据来分析系统低频振荡特性,避免求解大规模系统的特征值,本文主要通过此类方法来验证算法的有效性。

模型阶数 P 的确定是一个重要问题,但实际大型互联电力系统动态过程中系统阶数是未知的,或者非常高,任何用于拟合的模型都只能是一个降阶的近似模型。若按发电机数目乘以每台发电机详细模型的阶数来选择辨识模型的阶数,这需要大量的数据,甚至可能是不现实的。值得庆幸的是,通常最受重视的是系统低频振荡的主导模式,并不要求获得所有的振荡模式。

采用 TLS-ESPRIT 算法,信号模型阶数在计算过程中更容易确定。通常当 $i > P$ 时,由式(8)得到的矩阵 $\mathbf{X}$ 的奇异值 ξ_i 会显著地减小。若存在整数 i 使得:

$$\begin{cases} \frac{\xi_i}{\xi_1} \geq K_c \\ \frac{\xi_{i+1}}{\xi_1} < K_c \end{cases} \quad (14)$$

则可以近似地取 $P = \lceil i/2 \rceil \times 2$ 为降维模型阶数, $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整函数。参数 K_c 取决于测量信号的噪声水平等因素,可以通过观察 ξ_i 的变化趋势或者根据经验来确定。值得说明的是,截断选择最大的 P 个奇异值及其特征向量,产生一个近似的低阶矩阵 $\mathbf{U}_s \mathbf{\Sigma}_s^H$,蕴含了一个滤波过程,显著地降低了噪声对算法性能的影响,在较低的信噪比(SNR)条件下也具有较高的性能。

大规模的电力系统低频振荡模态分析可以分为 2 步来完成:首先通过相量测量单元(PMU)等测量装置或时域仿真得到系统的振荡信号,然后通过 TLS-ESPRIT 算法计算系统各个振荡模式的频率和阻尼等参数。算法在实际应用中通常还需要设置合理的前置信号处理环节来进一步提高对低频振荡信号的辨识精度,譬如采用去直环节来滤去原始信号中的直流分量以放大信号的振荡部分、增加低通滤波环节来减少高频杂散信号的影响等。

3 算例仿真

构造一个测试信号来验证 TLS-ESPRIT 算法的有效性。测试信号具体参数如表 1 所示,它有一定的代表性,包含 3 个振荡模式,频率范围为 0.3 Hz~1.3 Hz,阻尼比分别为 5.3%, 9.9%, 14.2%。信号被均值为 0、方差为 0.003 的白噪声污染,其波形如图 1 所示。

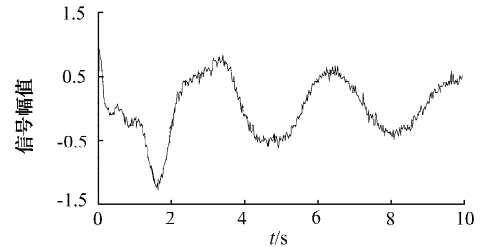


图 1 包含 3 个主导模式的合成测试信号
Fig. 1 Synthesized signal with three dominant modes

对 0 s~10 s 的 500 个数据点进行 TSL-ESPRIT 算法分析(采样频率为 50 Hz)。由式(8)得到的矩阵 $\mathbf{X}$ 的奇异值 ξ_i 随 i 的变化趋势如图 2 所示。

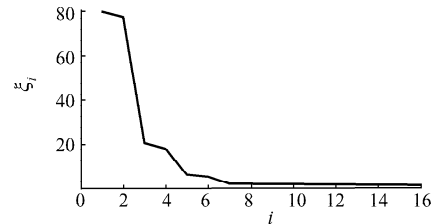


图 2 数据矩阵 $\mathbf{X}$ 的奇异值
Fig. 2 Singular values of data matrix $\mathbf{X}$

由图 2 可知:当 $i > 8$ 时, ξ_i 变化较小,故可认为此合成信号可以用 8 阶模型来近似拟合,此时 $K_c = \xi_8 / \xi_1 = 0.0251$ 。TLS-ESPRIT 算法得到的信号参数估计值如表 1 所示。通过比较发现,此算法能较精确地辨识出各个振荡模式的频率、幅值、阻尼比和初始相角,具有很高的频率分辨率。由于此算法把信号分成噪声空间和信号空间,通过信号空间来辨识信号参数,抗噪声能力较强。

表 1 TLS-ESPRIT 分析结果与理论值比较
Table 1 Comparison of parameters of the signal in theory and that estimated by TLS-ESPRIT

模式	取值	频率/Hz	阻尼比/(%)	幅值	相角/(°)
1	理论值	0.300	5.30	1.000	20.0
	估计值	0.300	5.38	1.000	20.0
2	理论值	0.800	9.90	0.800	50.0
	估计值	0.799	10.28	0.797	51.3
3	理论值	1.300	14.20	0.600	100.0
	估计值	1.296	13.94	0.579	99.4

4 机 2 区域系统^[1]和新英格兰 10 机 39 节点系统^[19]的仿真结果见附录 A。仿真结果再次说明基于 TLS-ESPRIT 算法能够使用较短观测时间的数据有效地辨识电力系统低频振荡主导模式。由于可观性的原因,系统受到扰动后,根据一个通道信号也许不能完全辨识出系统所有的振荡模式,但是均能够准确辨识出系统的主导模式;为了辨识出更多的局部振荡模式,需要电力系统不同观测点的测量数据,广域测量系统(WAMS)为此提供了便利。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参 考 文 献

[1] KUNDER P. Power system stability and control. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.

[2] 徐贤, 万秋兰. 低频振荡模式选择法的再改进. 电力系统自动化, 2003, 27(17): 23-25, 72.

XU Xian, WAN Qiulan. Re-modified SMA method for power system low-frequency oscillation analysis. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(17): 23-25, 72.

[3] JOHNSON M A, ZARAFONITIS I P, CALLIGARIS M. Prony analysis and power system stability: some recent theoretical and applications research// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting: Vol 3, Jul 16-20, 2000, Seattle, WA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 1918-1923.

[4] 董航, 刘涤尘, 邹江峰. 基于 Prony 算法的电力系统低频振荡分析. 高电压技术, 2006, 32(6): 97-100.

DONG Hang, LIU Dichen, ZOU Jiangfeng. Analysis of power system low frequency oscillation based on Prony algorithm. High Voltage Engineering, 2006, 32(6): 97-100.

[5] 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. 清华大学学报: 自然科学版, 2004, 44(7): 883-887.

XIAO Jinyu, XIE Xiaorong, HU Zhixiang, et al. Prony method for online identification of low-frequency oscillations in power system. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2004, 44(7): 883-887.

[6] 管秀鹏, 程林, 孙元章, 等. 基于 Prony 方法的大型互联电网 PSS 参数优化设计. 电力系统自动化, 2006, 30(12): 7-11.

GUAN Xiupeng, CHENG Lin, SUN Yuanzhang, et al. PSS parameter optimization on large-scale interconnection power grid

based on Prony method. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(12): 7-11.

[7] 张鹏飞, 薛禹胜, 张启平. 电力系统时变振荡特性的小波脊分析. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 32-34, 66.

ZHANG Pengfei, XUE Yusheng, ZHANG Qiping. Power system time-varying oscillation analysis with wavelet ridge algorithm. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 32-34, 66.

[8] 李天云, 高磊, 赵妍. 基于 HHT 的电力系统低频振荡分析. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 24-30.

LI Tianyun, GAO Lei, ZHAO Yan. analysis of low frequency oscillations using HHT method. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(14): 24-30.

[9] ROY R, PAULRAJ A, KAILATH T. ESPRIT: a subspace rotation approach to estimation of parameters of cisoids in noise. IEEE Trans on Acoustics, Speech, Signal Processing, 1986, 34(5): 1340-1342.

[10] ROY R, KAILATH T. ESPRIT: estimation of signal parameters via rotational invariance techniques. IEEE Trans on Acoustics, Speech, Signal Processing, 1989, 37(7): 984-995.

[11] MANOLAKIS D G, INGLE V K, KOGON S M. Statistical and adaptive signal processing. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2000.

[12] HUFFEL S V. Enhanced resolution based on minimum variance estimation and exponential data modeling. Signal Processing, 1993, 33(3): 333-355.

[13] ZHANG Jing, XU Zheng, PAN Wulue, et al. TLS-ESPRIT based method for harmonics and interharmonics analysis in power systems// Proceedings of 12th International Conference on Harmonics and Quality of Power, Oct 1-5, 2006, Cascais, Portugal.

[14] BOLLEN M H J, STYVAKTAKIS E, GUI Y H. Categorization and analysis of power system transients. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 2298-2306.

[15] DAFIS C J, NWANKPA C O, PETROPULU A. Analysis of power system transient disturbances using an ESPRIT-based method// Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting: Vol 1, Jul 16-20, 2000, Seattle, WA, USA. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2000: 437-442.

[16] ZEINELDIN H H, ABDEL-GALIL T, EI-SAADANY E F, et al. Islanding detection of grid connected distributed generators using TLS-ESPRIT. Electric Power Systems Research, 2007, 77(2): 155-162.

[17] GOLUB G H, LOAN C F V. Matrix computations. Baltimore and London: The Johns Hopkins University Press, 1996.

[18] 孙衢, 徐光虎, 陈陈. 负荷模型动态特性不确定性对低频振荡的影响. 电力系统自动化, 2003, 27(10): 11-14, 66.

SUN Qu, XU Guanghu, CHEN Chen. Effects of uncertainties in composite load models on low-frequency oscillations in power systems. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(10): 11-14, 66.

[19] PAI M A. Energy function analysis for power system stability. Boston, MA, USA: Kluwer Academic Publishers, 1989.

张 静(1980—),男,博士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析、新型直流输电、信号处理。E-mail: eejzhang@yahoo.com

为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量。

王 峰(1984—),男,博士研究生,主要研究方向为直流输电。

徐 政(1962—),男,博士,教授,博士生导师,研究方向

TLS-ESPRIT Based Method for Low Frequency Oscillation Analysis in Power System

ZHANG Jing, XU Zheng, WANG Feng, CHANG Yong

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A novel TLS-ESPRIT (total least squares-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques) based method for the analysis of low frequency oscillations in power systems is presented. The method is one of the subspace-based high resolution techniques, which decomposes the signal into signal subspace and noise subspace from the data matrix that is directly made up of measured data. The method is capable of extracting crucial dynamic characteristics from a system of any size with high precision, and the information can be further used for designing damping controllers. The theoretical aspects of the TLS-ESPRIT analysis method are firstly revisited briefly in the paper. Then, to illustrate the proposed technique, three test cases are investigated, including analysis of a synthetic signal, a four-machine two-area power system and the New England 10-generator 39-bus system. Simulation results confirm the validity of the method and show that it has great potential as an alternative powerful tool for online and offline analysis of the low frequency oscillations in power systems.

This work is supported by the Grand Project of the National Eleventh Five-Year Research Program of China (No. 2006BAA02A17).

Key words: low frequency oscillation; total least squares (TLS); TLS-ESPRIT; high resolution; subspace

附录 A

A1 算例 1:4 机 2 区域电力系统

4 机 2 区域简单电力系统^[1]网络结构如图 A1 所示。发电机均采用 6 阶详细模型，不考虑励磁系统的作用，取饱和系数 $S(1.0) = 0.039\ 2$ ， $S(1.2) = 0.267$ 。负荷都转化为恒阻抗模型。在系统正常运行的情况下，2 个区域的交换功率为 400 MW。

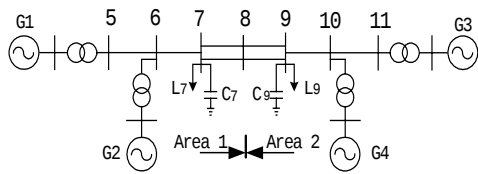


图 A 1 2 区域系统单线图

Fig.A1 Single line diagram of two-area system

此系统是一个弱阻尼系统，包含一个全局振荡模式和 2 个局部振荡模式。在 PSS/E 中对上述系统进行时域仿真，施加小扰动，在 $t=1.0\text{ s}$ 时母线 9 处增加一个小的负荷，持续 0.1 s 后切除。图 A2(a)与 (b)分别是发电机 G2 和 G3 相对于 G1 的功角振荡曲线。由于扰动后系统一般会进入非线性区，通常不能直接从扰动后瞬间立即开始做 TLS-ESPRIT 分析。对上述 2 条振荡曲线上 5 s~9 s 的 240 个数据点(采样频率 60 Hz，每周期 1 个点)分别做 TLS-ESPRIT 分析。根据经验取 $K_c = 0.001$ (下同)，分析结果如表 A1 所示(略去了阻尼比大于 10%的振荡模式)。

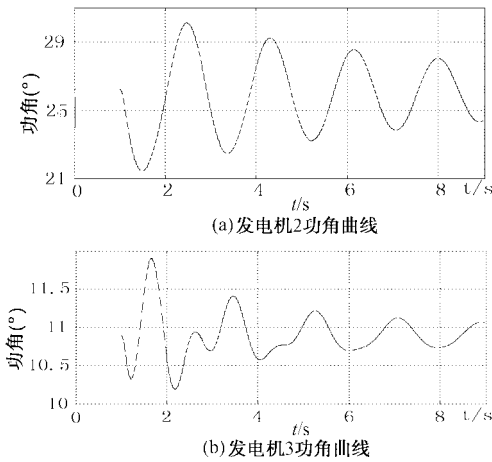


图 A2 发电机 G2 和 G3 功角曲线

Fig.A2 Angle curves of G2 and G3

表 A1 TLS-ESPRIT 从 G2，G3 功角曲线估计的主导振荡模式

Table A1 The dominant modes estimated from angle of G2 and G3 by TLS-ESPRIT method

信号	模式	频率/(HZ)	阻尼比/(%)	幅值	初始相位/(°)
G2	1	0.543	3.78	2.920	130.0
	2	1.081	9.05	0.042	-124.6
G3	1	0.543	3.80	0.266	-48.0
	2	1.102	8.61	0.089	-130.0

通过这 2 条振荡曲线均能检测到 0.54 Hz 的振荡模式，它是该运行点下区域 1 和区域 2 之间的全局振荡模式，占主导地位。另外 G2 和 G3 还分别参与 1.08 Hz 和 1.10 Hz 模式的区域内局部振荡。利用 PSS/E 的特征值分析程序可以比较精确地计算出系统的特征值和特征向量，得出系统低频振荡主导模式的频率和阻尼。表 A2 列出了阻尼比小于 10% 的所有模式。比较表 A1 和表 A2 可以发现，TLS-ESPRIT 使用较少的数据（4 s）能够辨识出系统的全局主导振荡模式，辨识结果与采用 PSS/E 仿真软件特征值分析方法获得的精确值十分接近,同时可以辨识出每台发电机参与的主要局部振荡模式。

表 A2 PSS/E 计算的主要特征

Table A2 The dominant oscillation characteristics calculated by PSS/E				
模式	频率/(Hz)	阻尼比/(%)	特征值实部	特征值虚部
1	0.541	3.84	-0.130 46	3.398 3
2	1.076	8.99	-0.610 24	6.761 9
3	1.112	8.79	-0.616 73	6.987 1

A2 算例 2:新英格兰 10 机 39 节点系统

为了进一步验证 TLS-ESPRIT 方法在大电网低频振荡分析中的有效性，对图 A3 所示的新英格兰 10 机 39 节点测试系统^[19]进行分析。本算例中发电机采用 6 阶详细模型，并计及自动电压调节器(AVR)的作用，负荷均采用恒阻抗模型。给系统一个小的扰动，在 t=1.0 s 时，母线 19 处负荷发生一个小的变化，0.1 s 后负荷恢复到扰动前的水平。以 G4 相对于 G1 的功角曲线为例(见图 A3)，取 5 s~9 s 的数据做 TLS-ESPRIT 分析，G4 参与的主要振荡模式有 2 个：振荡频率为 0.606 Hz 左右的全局振荡模式，振幅较大，阻尼较弱，约为 7.78%；振荡频率为 1.379 Hz 左右的局部振荡模式，阻尼较弱，约为 8.2%。在相同工况下对此系统采用 PSS/E 仿真软件的特征值分析程序计算，可知系统的全局振荡模式为 0.601 Hz 左右，阻尼比约为 7.77%，G4 除参与 0.601 Hz 左右的全局振荡模式外，其参与的主要局部振荡模式是 1.376 Hz 模式，阻尼比约为 8.6%。2 种方法得到的分析结果很接近，证实了辨识结果的有效性。大量仿真试验表明由其他的振荡曲线也均可以准确辨识出系统低频振荡的主导模式。

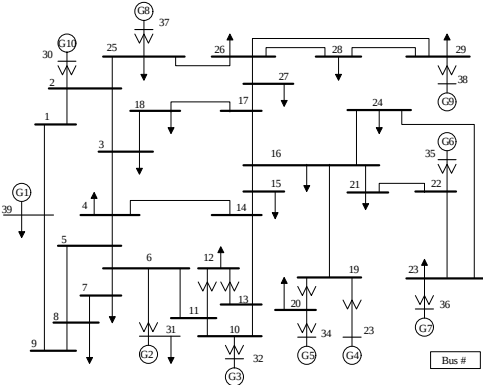


图 A3 New England 测试系统单线图

Fig.A3 Single line diagram of New England test system

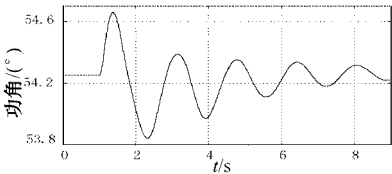


图 A4 发电机 G4 功角曲线

Fig.A4 Angle curves of G4