基于改进STD法的电力系统低频振荡辨识

韩 润[1],滕予非[2],谢 剑[1],王晓茹[1],车玉龙[1]
(1. 西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 610031;2. 国网四川省电力公司电力科学研究院,四川 成都 610072)

摘要:介绍稀疏时域(STD)法的基本理论并对其进行改进,给出基于该方法进行低频振荡模式参数辨识的具体实施步骤。16机系统时域仿真数据和某实际电网相量测量单元(PMU)实测数据验证了改进STD法的有效性和实用性。改进STD法与总体最小二乘-旋转不变技术(TLS-ESPRIT)及Ibrahim时域(ITD)算法辨识结果的对比表明,改进STD法在准确性和抗噪性方面均表现较好;与含低通滤波器的多通道ITD算法相对比,改进STD法无需对输入信号进行低通滤波即可实现准确辨识。

关键词:改进STD法;自由响应;低频振荡辨识;抗噪性
中图分类号:TM 712 **文献标识码**:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.009

0 引言

随着电力工业的发展,我国电网进入了一个全国联网、大区互联和整体资源优化配置的重要时期。电网规模和线路负荷不断增大,快速励磁系统大量投运,随之而来的低频振荡问题也日益突出。当系统在某些特定运行方式下存在弱阻尼或负阻尼的振荡模式时,扰动后的振荡现象将持续较长时间或增幅振荡,严重影响电力系统的安全稳定运行[1-4]。目前,及时准确地对振荡波形进行有效分析,获得振荡信号的特征参数是研究低频振荡的一种重要手段,对电网的安全稳定运行和控制有着重要的理论和现实意义。

目前基于量测数据的电力系统低频振荡参数辨识已有众多研究成果,文献[5-6]提出用Prony模型进行电力系统低频振荡特性分析,该算法直接提取系统振荡信号中不同模态对应的幅值、相位、频率和衰减因子等特征信息,算法简单方便,应用广泛。但Prony算法对噪声敏感,在分析含有测量噪声的振荡信号时结果误差较大,对Prony算法的改进不断被提出,在抗噪性方面也有一定程度的提高,但在噪声水平较高时结果仍存在较大误差[7]。文献[8]将自回归滑动(ARMA)模型应用于低频振荡模态参数辨识中,但对阻尼比的辨识误差较大。总体最小二乘-旋转不变技术(TLS-ESPRIT)是对基于旋转不变技术(ESPRIT)的信号参数估计算法的改进,抗噪性能优异[9],但其只能对单一信号进行辨识,不能同时对多组信号进行分析处理,且计算过程要进行较大矩阵的奇异值分解,较为耗时。文献[10]引入多通道Ibrahim时域(ITD)算法用于区域间低频振荡辨识,该算法可同时辨识多个振荡模式。但为了得到较好的辨识结果,在处理较大噪声信号时,需在ITD算法前加一个低通滤波器。此外,还有快速傅里叶变换(FFT)算法、小波算法等,在具体辨识中均因算法实施困难或精度问题难以广泛应用[11-12]。

稀疏时域(STD)算法是Ibrahim于1986年提出的,最初被应用于结构振动参数的识别,本文将其引入电力系统中并进行改进,实现对低频振荡参数的辨识。STD法采用实测数据直接构造自由响应矩阵,基于自由响应的数学模型建立特征方程,求解特征值后再根据模型特征值与系统特征值之间的关系,求解出参与振荡的模态频率和阻尼比。该算法的核心在于利用了自由响应矩阵和延时自由响应矩阵之间的线性关系,不仅节省了计算时间,而且有较高的识别精度,同时也减少了用户对参数的选择[13]。

1 STD法的原理

设n阶系统在自由振荡时,某一观测点的振荡信号可以表示为一系列复指数函数的线性组合,即:

$$x(t)=\sum_{i=1}^{m}p_i\mathrm{e}^{\lambda_i t}=\sum_{i=1}^{m}p_i\mathrm{e}^{(-\xi_i\omega_i+\mathrm{j}\omega_i\sqrt{1-\xi_i^2})t} \tag{1}$$

其中,$x(t)$为系统某一观测点的自由响应;λ_i、p_i分别为第i个振荡模式对应的特征值和振型系数;m为阶数的2倍,即$m=2n$;ξ_i、ω_i分别为第i个振荡模式的阻尼比和角频率,则第i个振荡模式对应的振荡频率为$f_i=\omega_i/(2\pi)$。

若系统有r个观测点,对任意观测点j,以等时间间隔Δt采样,可得到$N+1$个数据序列$x_j(t_1)$、$x_j(t_2)$、…、$x_j(t_{N+1})$,其中N一般为4~5个振荡周期的数据长度。由r个观测点的观测数据构造响应矩阵$\boldsymbol{\Phi}$:

$$\boldsymbol{\Phi}=\begin{bmatrix}x_1(t_1) & x_1(t_2) & \cdots & x_1(t_N)\\ x_2(t_1) & x_2(t_2) & \cdots & x_2(t_N)\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ x_r(t_1) & x_r(t_2) & \cdots & x_r(t_N)\end{bmatrix} \tag{2}$$

收稿日期:2018-07-09;**修回日期**:2018-12-09
基金项目:四川省重点研发计划项目(2017GZ0054)
Project supported by Sichuan Major Research & Development Project(2017GZ0054)

将式(1)代入式(2)化简整理可得:

$$\boldsymbol{\Phi}=\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\Lambda} \tag{3}$$

$$\boldsymbol{\psi}=\begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1m} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2m} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_{r1} & p_{r2} & \cdots & p_{rm} \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Lambda}=\begin{bmatrix} e^{\lambda_1 t_1} & e^{\lambda_1 t_2} & \cdots & e^{\lambda_1 t_N} \\ e^{\lambda_2 t_1} & e^{\lambda_2 t_2} & \cdots & e^{\lambda_2 t_N} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ e^{\lambda_m t_1} & e^{\lambda_m t_2} & \cdots & e^{\lambda_m t_N} \end{bmatrix}$$

将式(1)延时 Δt 后有:

$$x(t_{k+1})=x(t_k+\Delta t)=\sum_{i=1}^{m} p_i e^{\lambda_i \Delta t} e^{\lambda_i t_k} \tag{4}$$

因此将式(2)延时 Δt 后可得:

$$\tilde{\boldsymbol{\Phi}}=\begin{bmatrix} x_1(t_2) & x_1(t_3) & \cdots & x_1(t_{N+1}) \\ x_2(t_2) & x_2(t_3) & \cdots & x_2(t_{N+1}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_r(t_2) & x_r(t_3) & \cdots & x_r(t_{N+1}) \end{bmatrix} \tag{5}$$

将式(5)代入式(4)中并化简可得:

$$\tilde{\boldsymbol{\Phi}}=\boldsymbol{\psi}\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\Lambda} \tag{6}$$

其中,$\boldsymbol{\alpha}=\mathrm{diag}[\,e^{\lambda_1 \Delta t} \quad e^{\lambda_2 \Delta t} \quad \cdots \quad e^{\lambda_m \Delta t}\,]$。

联立式(3)和式(6),消去 $\boldsymbol{\psi}$ 可得:

$$\tilde{\boldsymbol{\Phi}}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}=\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\alpha} \tag{7}$$

由于 $\tilde{\boldsymbol{\Phi}}$ 是由 $\boldsymbol{\Phi}$ 延时所得,因此两矩阵之间存在着如下的线性关系:

$$\tilde{\boldsymbol{\Phi}}=\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{B} \tag{8}$$

式(8)中的矩阵 $\boldsymbol{B}$ 有如下形式:

$$\boldsymbol{B}=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_1 \\ 1 & 0 & 0 & \cdots & 0 & b_2 \\ 0 & 1 & 0 & \cdots & 0 & b_3 \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & 1 & b_N \end{bmatrix} \tag{9}$$

从式(9)可以看出,$\boldsymbol{B}$ 是一个仅有最后一列元素未知的 Hessenberg 矩阵。为求解最后一列未知元素,由式(8)可知:

$$\boldsymbol{\Phi}\boldsymbol{b}=\tilde{\boldsymbol{\phi}} \tag{10}$$

其中,$\boldsymbol{b}$ 为矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的最后一列元素构成的向量;$\tilde{\boldsymbol{\phi}}$ 为矩阵 $\tilde{\boldsymbol{\Phi}}$ 的最后一列元素构成的向量。

将式(8)代入式(7),整理可得:

$$\boldsymbol{B}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}=\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\alpha} \tag{11}$$

显然式(11)为一个标准的特征值方程,矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的第 i 阶特征值为 $\tilde{\lambda}_i=e^{\lambda_i \Delta t}$,因此求取矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的特征值便可得到与系统振荡模态相对应的频率 f_i 和阻尼比 ξ_i,即:

$$\begin{cases} V_i=\ln \lambda_i \\ f_i=\dfrac{|V_i|}{2\pi\Delta t} \\ \xi_i=\dfrac{1}{\sqrt{1+(\mathrm{Im}(V_i)/\mathrm{Re}(V_i))^2}} \end{cases} \tag{12}$$

上述为 STD 法的基本原理,由式(8)可知,$\boldsymbol{B}$ 为 $N\times N$ 阶矩阵,其规模完全由 N 决定,通过大量仿真数据的分析发现,直接采用 STD 法进行低频振荡参数辨识,结果误差大,且矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的规模也大,占用存储空间大,缩短了辨识时间,难以实现在线应用。因此,本文在将该方法应用于电力系统低频振荡分析时稍作改进,使其既能保证辨识精度,又能降低存储空间,提高计算速度。

2　STD 法的改进

对于某观测点 s,以等时间间隔 Δt 进行采样,利用测量得到的 $N+1$ 个数据序列 $x_s(t_1)$、$x_s(t_2)$、…、$x_s(t_{N+1})$ 构造 Hankel 矩阵:

$$\boldsymbol{X}_s=\begin{bmatrix} x_s(t_1) & x_s(t_2) & \cdots & x_s(t_L) \\ x_s(t_2) & x_s(t_3) & \cdots & x_s(t_{L+1}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_s(t_M) & x_s(t_{M+1}) & \cdots & x_s(t_N) \end{bmatrix} \tag{13}$$

其中,$L+M-1=N$,根据大量仿真分析可以知道,当 $L=N/2$ 时,辨识结果较为理想。

将式(1)代入式(13)并化简整理可得:

$$\boldsymbol{X}_s=\boldsymbol{P}_s\boldsymbol{\Lambda} \tag{14}$$

$$\boldsymbol{P}_s=\begin{bmatrix} p_1 & p_2 & \cdots & p_M \\ p_1 e^{\lambda_1 \Delta t} & p_2 e^{\lambda_2 \Delta t} & \cdots & p_M e^{\lambda_M \Delta t} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ p_1 e^{\lambda_1 (M-1)\Delta t} & p_2 e^{\lambda_2 (M-1)\Delta t} & \cdots & p_M e^{\lambda_M (M-1)\Delta t} \end{bmatrix}$$

对 $r(r=1,2,\cdots)$ 个测量点的数据按式(13)依次构造 Hankel 矩阵,将所有矩阵合并构造多通道自由响应矩阵 $\boldsymbol{X}$,使得 $\boldsymbol{X}=[\,\boldsymbol{X}_1^{\mathrm{T}} \ \cdots \ \boldsymbol{X}_s^{\mathrm{T}} \ \cdots \ \boldsymbol{X}_r^{\mathrm{T}}\,]^{\mathrm{T}}$,则有:

$$\boldsymbol{X}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{\Lambda} \tag{15}$$

其中,$\boldsymbol{P}=[\,\boldsymbol{P}_1^{\mathrm{T}} \ \cdots \ \boldsymbol{P}_s^{\mathrm{T}} \ \cdots \ \boldsymbol{P}_r^{\mathrm{T}}\,]^{\mathrm{T}}$。

同样地,将式(15)延时 Δt 后可得:

$$\tilde{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{P}\boldsymbol{\alpha}\boldsymbol{\Lambda} \tag{16}$$

其中,$\boldsymbol{\alpha}=\mathrm{diag}[\,e^{\lambda_1 \Delta t} \quad e^{\lambda_2 \Delta t} \quad \cdots \quad e^{\lambda_M \Delta t}\,]$。

联立式(15)和式(16),消去 $\boldsymbol{P}$ 可得:

$$\tilde{\boldsymbol{X}}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{\Lambda}^{-1}\boldsymbol{\alpha} \tag{17}$$

由于 $\tilde{\boldsymbol{X}}$ 是由 $\boldsymbol{X}$ 延时所得,因此两矩阵之间存在着如下的线性关系:

$$\tilde{\boldsymbol{X}}=\boldsymbol{X}\boldsymbol{B} \tag{18}$$

其中，$\boldsymbol{B}$ 为 $L \times L$ 阶矩阵，一方面降低了其存储的空间，提升了计算的速度，另一方面由式（13）可知，增加了虚拟测点，提高了辨识准确度。

同式（10）所示，有：

$$\boldsymbol{X}\boldsymbol{b}=\tilde{\boldsymbol{x}} \tag{19}$$

其中，$\tilde{\boldsymbol{x}}$ 为矩阵 $\tilde{\boldsymbol{X}}$ 的最后一列元素构成的向量。将式（19）等号左右同乘 $\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}$，可得式（20）与式（21）。

$$\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}\boldsymbol{b}=\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{x}} \tag{20}$$

$$\boldsymbol{Y}\boldsymbol{b}=\boldsymbol{a} \tag{21}$$

其中，$\boldsymbol{Y}=\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{X}$；$\boldsymbol{a}=\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}\tilde{\boldsymbol{x}}$ 。

对于式（21），采用逐次超松弛（SOR）迭代法进行求解[14]，这样可以避免大规模矩阵的直接求逆运算。

因此，相比原始 STD 法，改进后的算法采用虚拟测点技术，提高了辨识结果的准确度，降低了矩阵的规模，在一定程度上也减少了计算时间。

3 基于改进 STD 法的区域间低频振荡分析

区域间的低频振荡问题严重影响大区电网的互联，限制互联系统的传输能力，因此及时准确地辨识出区域间低频振荡参数，对大区电力系统稳定安全运行有重要意义[15-17]。本文使用改进后的 STD 法对区域间低频振荡进行分析，计算时输入量可以是与低频振荡强相关的状态变量，如发电机角速度增量或功角增量，也可以是发电机有功出力等。具体实施步骤如下：

a. 选择需分析的仿真或相量测量单元（PMU）实测的自由振荡数据（本文中选择的是角速度增量，采样时间为 0.01 s）；

b. 根据式（13）利用每台发电机的量测数据构造 Hankel 矩阵，再根据式（15）构造多通道自由响应矩阵 $\boldsymbol{X}$（本文在 IEEE 16 机仿真算例中选择 N 为 15 s 内的仿真数据长度，采样时间为 0.01 s，$L=N/2$）；

c. 重复上述操作构造延时 Δt 的多通道自由响应矩阵 $\tilde{\boldsymbol{X}}$；

d. 利用式（18）计算矩阵 $\boldsymbol{B}$，通过 SOR 迭代法求解式（21），即可得到完整的矩阵 $\boldsymbol{B}$；

e. 求解矩阵 $\boldsymbol{B}$ 的特征根，计算不同振荡模态对应的频率和阻尼比。

电力系统低频振荡问题大致可分为本地振荡和区域间振荡，区域间振荡频率一般为 0.1～0.7 Hz[1]，且在实际运行中往往关心的是阻尼较弱的振荡模式，因此，基于大量的仿真实验和经验，本文采用改进 STD 法进行区域间低频振荡分析时，为了能较为快速并准确地获得阻尼比较低的区域间低频振荡参数，对该算法的计算结果进行筛选，筛选条件如下：频率范围为 0.1～1 Hz，阻尼比范围为小于 20%。

4 算例分析

本节使用改进 STD 法对 IEEE 16 机系统的时域仿真数据和 PMU 实测的电网数据进行分析来说明该方法的正确性和有效性。

4.1 IEEE 16 机系统仿真算例

该系统是新英格兰-纽约互联电力系统的简化模型，如附录中图 A1 所示，其中发电机采用六阶详细模型，且都配有励磁和电力系统稳定器（PSS），负荷采用恒功率负荷模型，通过调节 PSS 参数来改变系统机电模式的阻尼比。IEEE 16 机系统可划分为 5 个区域，其中区域 1、区域 2 和区域 3 为等值系统，区域 4 为纽约系统，区域 5 为新英格兰系统。

本文采用 IEEE 标准参数，用 PST（Power System Toolbox）作为仿真工具。调节该系统相关机组的 PSS 参数确定一组振荡模式，利用小扰动分析工具求解系统特征根，分析结果可得系统存在 4 个区域间低频振荡模式，其对应的频率和阻尼比如表 1 所示。

表 1 区域间低频振荡模式的频率和阻尼比

Table 1 Frequency and damp ratio of inter-area low-frequency oscillations

模式	频率/Hz	阻尼比/%
1	0.349 2	9.25
2	0.476 0	1.32
3	0.613 7	10.10
4	0.723 2	3.92

针对 4 个区域间低频振荡模式，给出 16 台发电机角速度对应的特征向量的分布情况，如附录中图 A2 所示。从图中可以直观地看出不同模式中发电机的相互振荡情况：模式 1，区域 1—3 中的发电机与区域 5 中的发电机相互振荡；模式 2，区域 3 中的发电机与其他区域中的发电机相互振荡；模式 3，区域 4 中的发电机与区域 5 中的发电机相互振荡；模式 4，区域 1、3 中的发电机与区域 2 中的发电机相互振荡。

设置线路 1-27 发生三相短路故障，故障点靠近母线 1 处，如附录中图 A1 所示。仿真时间 20 s，步长 0.01 s，2 s 开始故障，2.05 s 切除近端，2.1 s 切除远端，附录中图 A3 给出了 16 台发电机在仿真时间内的角速度振荡曲线。

4.1.1 改进 STD 法分析理想信号

在不考虑信号中的测量噪声时，将仿真所得数据直接用 STD 法和改进 STD 法进行分析。为了能更完整地分析 4 个区域间低频振荡模式，本文选择 16 台发电机的角速度增量作为输入信号，分析结果如表 2 所示。

表 2　不含噪声情况下 STD 法对频率和阻尼比的辨识结果

Table 2　Identification results of frequency and damping ratio by STD algorithm without noise

模式	频率/Hz			阻尼比/%		
	真实值	辨识值		真实值	辨识值	
		改进 STD 法	STD 法		改进 STD 法	STD 法
1	0.349 2	0.349 5	0.364 0	9.25	9.27	4.27
2	0.476 0	0.476 2	0.476 3	1.32	1.34	1.49
3	0.613 7	0.607 2	0.598 2	10.10	10.26	7.26
4	0.723 2	0.724 2	0.723 6	3.92	3.91	3.40

从表 2 可以看出,改进 STD 法辨识得到的 4 个区域间低频振荡模式的频率和阻尼比与真实值很接近,频率和阻尼比相对真实值的误差很小,STD 法的辨识频率与真实频率较为接近,但辨识阻尼比相对真实阻尼比的误差较大。这说明在振荡信号不含量测噪声的情况下,改进 STD 法能通过一次计算准确得到系统的 4 个区域间振荡模式,而直接使用 STD 法却很难实现准确辨识。

为了进一步测试改进 STD 法的性能,将其辨识结果与 TLS-ESPRIT 算法、ITD 算法的辨识结果进行对比。由于 TLS-ESPRIT 算法只能输入单一量测点的信号,因此本文在计算时依次使用 TLS-ESPRIT 算法对 16 台发电机的角速度增量进行辨识。图 1 给出了 TLS-ESPRIT 算法的 16 次辨识结果、改进 STD 法的 1 次辨识结果、ITD 算法的 1 次辨识结果以及基于模型计算所得的真实值。

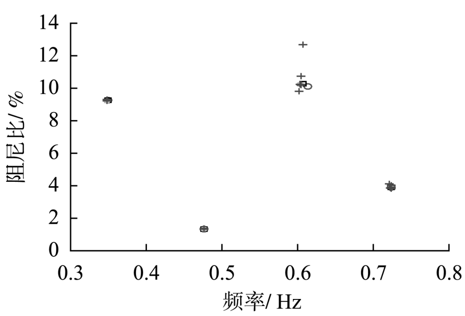


图 1　3 种方法辨识结果与真实值的对比

Fig.1　Comparison between identification results of three algorithms and real values

从图 1 中可以看出,在不含测量噪声的情况下,改进 STD 法与 ITD 算法的辨识结果与真实值都十分接近。而 TLS-ESPRIT 算法使用单一测量点的数据进行辨识时,很难一次性对 4 个区域间振荡模式进行准确辨识,虽然可通过增加阶数来提高分辨率,但对参与度较低的振荡模式,其辨识结果误差仍较大,甚至无法辨识,如弱阻尼模式 4,由于参与振荡的机组较少,TLS-ESPRIT 算法只有在分析参与振荡的几台发电机的数据时才能得到较好的结果,但在分析其他机组的振荡数据时无法得到该模式或辨识结果误差较大。

4.1.2　改进 STD 法分析含噪声信号

实际中的量测数据往往都含有噪声,通常在仿真研究中采用时域仿真数据叠加高斯白噪声的方式来模拟实际量测数据,用信噪比 SNR(Signal-Noise Ratio)表示量测噪声水平,计量单位为 dB,计算方法如式(14)所示。

$$\mathrm{SNR}=10\lg(P_{\mathrm{S}}/P_{\mathrm{N}}) \tag{14}$$

其中,P_{S} 为信号的有效功率;P_{N} 为噪声的有效功率。为了降低偶然性对辨识结果的影响,本文采用多次试验的方式,对不同噪声水平下的量测数据均进行辨识,并对辨识结果进行统计分析。

由于在含噪声水平下 STD 法难以辨识出较为准确的结果,因此该情况下不再给出 STD 法的辨识结果。附录中表 A1、表 A2 分别给出信噪比为 40 dB、30 dB、20 dB 时,100 次仿真试验中改进 STD 法辨识 4 个区域间低频振荡模式频率和阻尼比的统计结果。可以看出,不同信噪比下,改进 STD 法辨识的频率和阻尼比的平均值相对真实值的误差都很小,样本的标准差也很小,说明本文算法在每次试验中都能较为准确地辨识得到 4 个区域间低频振荡模式。为了直观地表示辨识结果的准确性,将不同噪声水平下 100 次仿真试验的辨识结果与真实值绘于图中,如图 2 所示。

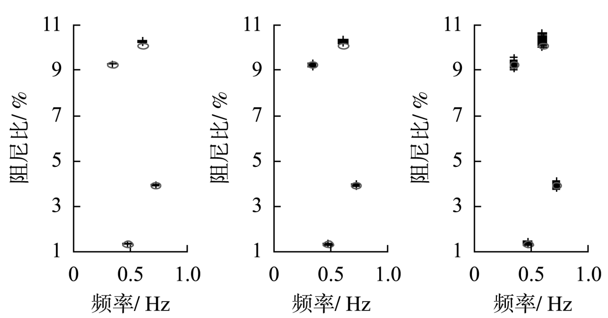


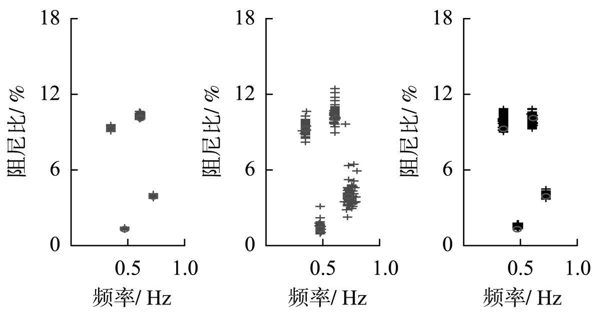
图 2　不同噪声水平下改进 STD 算法的辨识结果

Fig.2　Identification results of improved STD algorithm for different values of SNR

从图 2 中可以看出,当 SNR=40 dB 和 SNR=30 dB 时,改进 STD 法能准确地辨识得到 4 个区域间低频振荡模式,对应的频率和阻尼比基本与真实值吻合;当 SNR=20 dB 时,对于阻尼较弱的模式 2 和模式 4,改进 STD 法仍能准确辨识频率和阻尼比,但对阻尼较高的模式 1 和模式 3,改进 STD 算法的辨识结果与真实值之间有一定的误差,但误差比较小。

为了测试含噪声情况下改进 STD 法的性能,本文给出了改进 STD 法与 TLS-ESPRIT 算法、含低通滤波器的 ITD 算法(简称 LPF-ITD 算法)在相同噪声水平(SNR=20 dB)下辨识结果的对比。对于仅能辨识单一测点信号的 TLS-ESPRIT 算法,其辨识结

果是选取每次试验中辨识16台发电机数据得到的最优结果，如图3所示。从图中可以看出，在SNR=20 dB时，100次仿真试验中，改进STD法的辨识结果相比TLS-ESPRIT算法的辨识结果标准差更小，即每次试验的辨识结果距离真实值更为紧凑，这说明在测量噪声较大时，改进STD法的计算结果更为准确，抗噪性更好；与LPF-STD算法的辨识结果相比，在阻尼比较低时，二者结果都比较准确，在阻尼比较高时，改进STD法较好。



（a）改进STD法（b）TLS-ESPRIT算法（c）LPF-ITD算法
○真实值，+辨识值

图3 改进STD法与TLS-ESPRIT、LPF-ITD算法辨识结果对比（SNR=20 dB）

Fig.3 Comparison of identification results among STD TLS-ESPRIT and LPF-ITD algorithms（SNR=20 dB）

表3给出了4种方法平均一次的计算时间对比，计算中所用计算机的配置为：Intel（R） Core（TM） i7-8700K CPU@3.70 GHz，16 GB内存，Windows 10企业版，MATLAB平台。

表3 各算法平均一次计算时间

Table 3 Average computation time of each method

算法	时间/s	算法	时间/s
STD	1.759	LPF-ITD	0.015
改进STD	0.701	TLS-ESPRIT	0.122

从表3中可以看出，改进STD法的平均一次计算时间相比原始STD法大幅降低，而相比LPF-ITD算法和TLS-ESPRIT算法要长，但是考虑到辨识数据的采集时间，其计算时间在实际应用中可以接受。随着计算能力的提高，各算法在计算时间上的优劣性会降低，改进STD法的单通道数据处理、多通道数据处理以及用户参数选择简单的优势会更明显。

4.2 实际量测数据算例

本算例基于四川电网PMU实测数据，进一步验证改进STD法的实用性。2014年6月，四川电网内某500 kV母线发生单相接地短路故障，PMU记录了与华中主网相连的2条联络线上的有功功率振荡，见图4。在当时的网架结构下，基于模型的分析和长期实际运行经验均表明，四川电网与华中主网之间长期存在着一个频率约为0.32 Hz的振荡模式，该振荡模式也会随着电网运行条件的变化而变化。

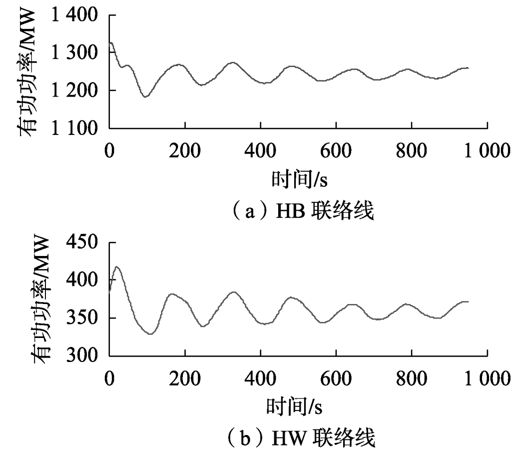


图4 联络线有功功率振荡曲线

Fig.4 Active power oscillation curves of tie lines

对图4所示的2条联络线的有功功率振荡数据进行辨识，结果如表4所示。从表中可以看出，改进STD法的频率辨识结果与经验值、TLS-ESPRIT算法辨识值和ITD算法辨识值非常接近，阻尼比辨识结果也比较接近，由于该阻尼比随着运行条件的变化而发生变化，难以确定具体的经验值，但通过与其他2种算法的对比可知，改进STD法可以对PMU实测数据进行辨识。

表4 改进STD法辨识PMU实测数据的结果

Table 4 Identification results of improved STD algorithm based on PMU measured data

算法	频率/Hz	阻尼比/%
改进STD	0.327 6	4.06
TLS-ESPRIT	0.323 6	4.37
ITD	0.323 5	5.36

5 结论

本文为电力系统低频振荡特征分析引入新的计算方法并进行改进，与其他时域模态辨识方法相同，改进STD法亦能直接利用扰动后的自由振荡数据进行低频振荡特征参数分析。16机典型系统仿真试验表明改进STD法能从系统自由振荡数据中准确辨识振荡模式对应的频率和阻尼比，比直接采用STD法的辨识结果要好很多，并与TLS-ESPRIT算法、LPF-ITD算法进行了比较，从结果可以看出，改进STD法可以一次性有效地得到所有区域间振荡模式的频率和阻尼比，计算效率和辨识精度比TLS-ESPRIT算法高，且在量测数据含噪声的情况下，改进STD法相比TLS-ESPRIT算法具有更强的抗噪性能。同时，改进STD法不需要对辨识信号进行低通滤波处理，相比LPF-ITD算法更有利于实现在线应用。最后，通过实测PMU数据对改进STD法进行了实用性验证，结果表明，该算法在实际电网模式辨识中切实可行。

附录见本刊网络版（http://www.epae.cn）。

参考文献:

[1] KUNDER P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw-Hill,1994:470-493.

[2] 高洁,李群湛,汪佳,等. 基于 NExT-ERA 与 SSI-DATA 环境激励下的低频振荡辨识方法比较[J]. 电力自动化设备,2016,36(1):89-96.
GAO Jie,LI Qunzhan,WANG Jia,et al. Comparisom of low-frequency oscillation identification between NExT-ERA and SSI-DATA ambient excitation methods[J]. Electric Power Automation Equipment,2016, 36(1):89-96.

[3] 刘思议,金涛,刘对. 基于改进小波阈值去噪和 RCRSV-MP 算法的电力系统低频振荡模态辨识[J]. 电力自动化设备,2017, 37(8):166-172.
LIU Siyi,JIN Tao,LIU Dui. Power system low-frequency oscillation mode identification base on improved wavelet threshold de-noising and RCRSV-MP algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(8):166-172.

[4] 谭谨,王晓茹,李龙源. 含大规模风电的电力系统小扰动稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(3):15-23.
TAN Jin,WANG Xiaoru,LI Longyuan. A survey on small signal stability analysis of power systems with wind power integration[J]. Power System Protection and Control,2014,42(3):15-23.

[5] HAUER J F,DEMEURE C J,SCHARF L L. Initial results in Prony analysis of power response signal[J]. IEEE Trans on Power Systems,1990,5(1):80-89.

[6] HAUER J F. Application of Prony analysis to the determination of modal content and equivalent models for measured power system response[J]. IEEE Trans on Power Systems,1991,6(3):1062-1068.

[7] JUN W. Feature extraction of localized scattering centers using the modified TLS-Prony algorithm and its applications[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics,2002,13(3):31-39.

[8] WIES R W,PIERRE J W,TRUDNOWSKI D J. Use of ARMA block processing for estimating stationary low-frequency electromechanical modes of power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems,2003, 18(1):167-173.

[9] 张静,徐政,王峰,等. TLS-ESPRIT 算法在低频振荡分析中的应用[J]. 电力系统自动化,2007,31(20):84-88.
ZHANG Jing, XU Zheng, WANG Feng, et al. TLS-ESPRIT based method for low frequency oscillation analysis in power system[J]. Automation of Electric Power Systems,2007,31(20):84-88.

[10] ZHANG Peng,WANG Xiaoru,WANG Xiangchao,et al. Synchronized measurement based estimation of inter-area electromechanical modes using the Ibrahim time domain method[J]. Electric Power Systems Research,2014,111:85-95.

[11] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京:清华大学出版社,2002: 349-390.

[12] 张俊峰,杨婷,陈珉,等. 基于 Prony 滑动平均窗算法的电力系统低频振荡特征分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):178-183.
ZHANG Junfeng,YANG Ting,CHEN Min,et al. Power system low-frequency oscillation characteristic analysisbased on Prony moving average window algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(10):178-183.

[13] SAMIR R I. An approach for reducing computational requirements in modal identification[J]. AIAA Journal,1986,24(10):1725-1727.

[14] 孙文瑜,杜其奎,陈金如. 计算方法[M]. 北京:电子工业出版社,2007:63-65.

[15] 常勇,徐政. SVC 广域辅助控制阻尼区域间低频振荡[J]. 电工技术学报,2006,21(12):40-46.
CHANG Yong,XU Zheng. SVC supplementary controller based on wide area signals to enhance damping of inter-area oscillation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,21(12):40-46.

[16] 于贻鑫,李鹏. 大区电网弱互联对互联系统阻尼和动态稳定性的影响[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):6-11.
YU Yixin,LI Peng. The impact of weak internection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(11):6-11.

[17] 蔡洋. 电网调度管理须与电网发展俱进-北美东北电网事故浅析[J]. 电网技术,2004,28(8):6-9.
CAI Yang. Power system operation control shoud be in step with its expansion[J]. Power System Technology,2004,28(8):6-9.

作者简介:

韩　润

韩　润(1990—),男,甘肃白银人,硕士,主要研究方向为电力系统稳定性分析与监测(**E-mail**:romo_han@163.com);

滕予非(1984—),男,四川成都人,高级工程师,博士,主要研究方向为超特高压交直流混联电网分析与控制(**E-mail**:yfteng2011@163.com);

谢　剑(1992—),男,湖北洪湖人,硕士,主要研究方向为电力系统稳定性分析及高压直流并网(**E-mail**:jianx2018@gmail.com);

王晓茹(1962—),女,四川成都人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统稳定性分析与控制(**E-mail**:xrwang@home.swjtu.edu.cn);

车玉龙(1988—),男,甘肃武山人,博士,主要研究方向为牵引供电系统与电力系统的耦合(**E-mail**:cylg717@163.com)。

Identification of low-frequency oscillation in power system based on improved STD algorithm

HAN Run[1],TENG Yufei[2],XIE Jian[1],WANG Xiaoru[1],CHE Yulong[1]

(1. School of Electrical Engineering,Southwest Jiaotong University,Chengdu 610031,China;
2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute,Chengdu 610072,China)

Abstract:The basic theory of STD(Spare Time Domain) algorithm is introduced,and the algorithm is improved, based on which,the concrete implementation steps of parameter identification for low-frequency oscillation are given. The validity and practicality of the improved STD algorithm are verified by the time domain simulation data of a 16-generator system and the PMU(Phase Measurement Unit) data of a practical power grid. The comparison of identification results among the improved STD algorithm,the TLS-ESPRIT(Total Least Square-Estimation of Signal Parameters via Rotation Invariance Techniques) and ITD(Ibrahim Time Domain) algorithm shows that the improved STD algorithm performs well in the aspects of accuracy and anti-noise performance,and it can realize accurate identification without low-pass filtering of the input signal compared with the multi-channel ITD algorithm with low-pass filter.

Key words:improved STD algorithm;free response;low-frequency oscillation identification;anti-noise

附录：

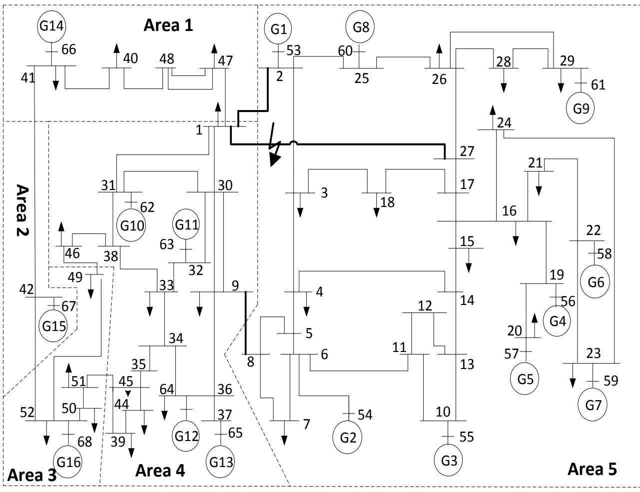


图 A1 IEEE 16 机系统结构

Fig.A1 Structure of IEEE 16-generator system

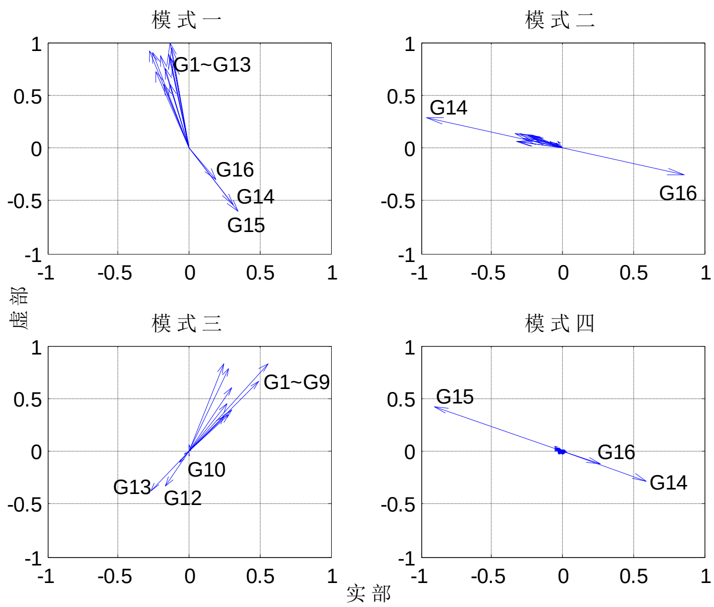


图 A2 发电机角速度对应特征向量的分布情况

Fig.A2 Distribution of eigenvectors corresponding to angular velocity of generators

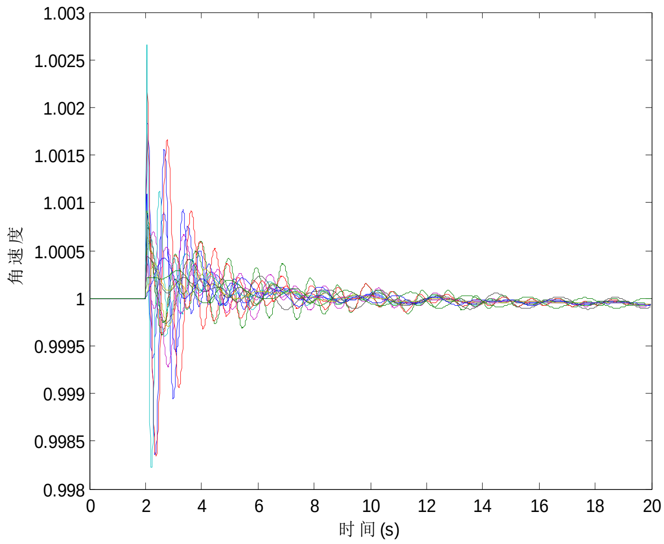


图 A3 IEEE 16 机系统中的 16 台发电机角速度振荡曲线

Fig.A3 Angular velocity oscillation curves of 16 generators in IEEE 16-generator system

表 A1 不同信噪比下改进 STD 法对频率辨识的统计结果

Table A1 Statistical results of frequency identification by STD method under different values of SNR

参数	SNR	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
真实值/Hz		0.3492	0.4760	0.6137	0.7232
平均值/Hz	40	0.3495	0.4762	0.6072	0.7242
	30	0.3494	0.4762	0.6075	0.7242
	20	0.3493	0.4761	0.6073	0.7243
误差/Hz	40	0.0003	0.0002	0.0065	0.0010
	30	0.0002	0.0002	0.0062	0.0010
	20	0.0001	0.0001	0.0064	0.0011
标准差/Hz	40	3.53×10^{-5}	2.0×10^{-5}	7.60×10^{-5}	4.78×10^{-5}
	30	0.0001	0.0001	0.0003	0.0002
	20	0.0003	0.0002	0.0008	0.0005

表 A2 不同信噪比下改进 STD 算法的阻尼比辨识统计结果

Table A2 Statistical results of damping ratio identification by improved STD method under different values of SNR

参数	SNR	模式 1	模式 2	模式 3	模式 4
真实值/%		9.25	1.32	10.10	3.92
平均值/%	40	9.27	1.34	10.26	3.91
	30	9.24	1.34	10.27	3.92
	20	9.28	1.36	10.32	3.93
误差/%	40	0.02	0.02	0.16	0.01
	30	0.01	0.02	0.17	0.00
	20	0.03	0.04	0.22	0.01
标准差/%	40	0.0093	0.0037	0.0143	0.0074
	30	0.0314	0.0118	0.0453	0.0237
	20	0.1007	0.0377	0.1203	0.0689