

DOI: 10.7667/PSPC161821

利用随机响应的低频振荡模式估计方法比较分析

杨健维¹, 贾勇², 何正友¹, 符玲¹

(1. 西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031; 2. 重庆理工大学电气与电子工程学院, 重庆 400054)

摘要: 电力系统随机响应中蕴含着低频振荡模式信息。比较了自相关分析、自然激励技术和随机减量技术等三种方法从随机响应中提取系统自由振荡响应的应用, 然后结合特征系统实现算法估计振荡模式频率和阻尼比。通过四机两区域系统和新英格兰系统的蒙特卡洛仿真, 从时间窗长、噪声水平、模式阻尼状态及多通道随机响应的模式估计方面, 对比分析了三种方法的估计性能和适用性。仿真结果表明, 基于自相关分析的自由振荡响应提取方法具有更好的适应性, 模式估计精度优于基于自然激励技术和随机减量技术的估计方法。

关键词: 低频振荡; 随机响应; 模式估计; 自相关分析; 随机减量技术; 自然激励技术

Comparison analysis for low-frequency oscillation mode estimation method using stochastic responses

YANG Jianwei¹, JIA Yong², HE Zhengyou¹, FU Ling¹

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Chongqing University of Technology, Chongqing 400054, China)

Abstract: Stochastic responses in power systems contain mode information of low-frequency oscillations. This paper compares three methods: Auto-Correlation analysis (AC), Natural Excitation Technique (NExT) and Random Decrement Technique (RDT), which are applied to extract system free oscillation response from stochastic response, and then estimates mode frequencies and damping ratios using Eigensystem Realization Algorithm (ERA). Monte Carlo simulations are carried out in the four-generator two-area system and the New England system, and the estimation performance and applicability of the three methods are compared and analyzed from the aspects of length of time window, noise level, mode damping condition and multi-channel stochastic responses. Simulation results show that the extraction of free response by means of AC has better adaptability, and the mode estimation results are more accurate than the methods based on NExT and RDT.

Key words: low frequency oscillations; stochastic response; mode estimation; auto-correlation analysis; random decrement technique; natural excitation technique

0 引言

随着以特高压电网为骨架的全网互联的推进, 电力系统规模不断扩大, 在提高电网运行的可靠性和资源利用的经济性的同时, 也带来了新的安全隐患, 近年来多次发生的低频振荡事件, 严重危及了电网的安全稳定运行^[1-3]。低频振荡是交流互联输电系统的固有特性, 及时准确地掌握低频振荡模式特征是有效抑制电力系统低频振荡现象的重要基础之一。近年来以相量测量单元为基础的广域测量系统在电网得到了广泛部署, 使得电力系统实时振荡特

性分析成为可能^[4]。因此, 利用广域同步量测的系统响应进行低频振荡模式估计得到了大量研究。

系统响应蕴含了系统的固有振荡特性, 如果外界输入满足一定条件, 即可利用信号分析工具从系统响应中估计得到系统的振荡模式参数。根据电网扰动的不同, 系统响应可分为两类: 一类是发电机切机、线路故障等大扰动激励的系统自由振荡响应, 这种大扰动可视为向系统施加一个脉冲或阶跃激励, 利用大扰动后系统的自由振荡响应, 可采用如 Prony 法^[5-6]、矩阵束法^[7-8]和特征系统实现算法 (Eigensystem Realization Algorithm, ERA)^[9-10]等方法进行模式估计。另一类是随机负荷变化等小幅度扰动激励的系统随机响应, 这种类噪声信号时刻存在, 利用随机响应估计低频振荡模式能够及时准确

基金项目: 中国铁路总公司科技研究开发计划课题 (2015J008-D); 四川省科技厅国际合作计划 (2015HH0055)

地反映当前系统的小扰动稳定性。由于随机响应不能直接用一系列复指数函数的线性叠加来拟合, 基于自由振荡响应的估计方法不能直接用于系统随机响应的模式估计中, 近年来, 利用随机响应的低频振荡模式估计研究出现了大量成果, 如 ARMA (Auto-Regressive Moving Average)法^[11-12]和随机子空间法等^[13]。

在利用随机响应进行低频振荡模式估计中, 存在一类借鉴自由振荡信号模式估计思路的方法, 即先通过某种方法从系统随机响应中提取系统自由振荡响应, 继而采用基于自由振荡响应的方法进行模式参数估计。自相关分析(Auto-Correction, AC)是时间序列分析中常用的提取系统自由响应的方法^[14]; ARMA 法就是利用采样数据的自相关函数建立 Yule-Walker 方程, 进而通过最小二乘算法估计振荡模式。在桥梁建筑等结构模态分析中, 自然激励技术(Natural Excitation Technique, NExT)和随机减量技术(Random Decrement Technique, RDT)广泛用于提取系统自由响应, 这两种方法也初步应用于基于电力系统随机响应的振荡模式估计中。文献[15-16]先采用 NExT 提取自由振荡响应, 然后分别采用 ERA 或 TLS-ESPRIT 方法进行振荡模式参数估计; 文献[17]则先采用 RDT 提取系统的自由振荡响应, 然后结合 Prony 算法估计振荡模式。

准确地从随机响应中提取系统自由振荡响应是低频振荡模式估计的一个关键步骤, 为了考察 AC、NExT、RDT 三种方法在从随机响应中提取系统自由振荡响应的性能, 本文通过四机两区域系统及新英格兰系统的蒙特卡洛仿真, 着重从低频振荡模式参数估计的统计结果, 详细对比分析了三种方法在不同时间窗长、不同噪声水平、不同阻尼状态及多通道随机响应分析等方面的模式估计性能。文中基于随机响应的模式估计方法的比较分析对估计算法开发及工程应用具有重要的指导意义。

1 自由振荡响应提取方法

电力系统是一个规模巨大的非线性系统, 在研究系统的小信号稳定性时, 通常将系统简化为线性时不变系统。系统正常运行过程中各个节点的负荷随机变化, 根据中心极限定理, 这种系统随机激励可视为高斯白噪声。由于系统输入无法测量, 系统可采用如下的离散状态空间模型描述。

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{t+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_t + \mathbf{w}_t \\ \mathbf{y}_t = \mathbf{C}\mathbf{x}_t + \mathbf{v}_t \end{cases} \quad (1)$$

式中: \mathbf{x}_t 为系统状态向量; \mathbf{y}_t 为系统输出向量; \mathbf{w}_t

和 \mathbf{v}_t 分别为系统噪声和测量噪声; \mathbf{A} 为系统状态矩阵; \mathbf{C} 为输出矩阵。

系统在随机负荷变化等激励下的系统输出也是随机信号。接下来介绍 AC、NExT 及 RDT 三种方法的基本原理, 通过从系统随机响应中提取自由振荡响应, 从而将系统在随机性输入下的随机性问题转化为一个确定性问题来处理。

1.1 自相关分析

自相关分析在时间序列分析建模中具有很广泛的应用, 文献[18]首次将系统随机响应用于振荡模式估计中, 通过与 Prony 法的对比分析指出随机响应的自相关函数可视为一系列衰减复指数函数之和。对于离散平稳随机信号 y , 自相关函数定义为

$$R_{YY}(\tau) = E[y(k)y(k-\tau)] \quad (2)$$

式中, $E[\bullet]$ 表示期望算子。应用于有限长的测量信号时, 上式可近似为

$$\hat{R}_{YY}(\tau) \cong \frac{1}{N} \sum_{k=\tau+1}^N y(k)y(k-\tau) \quad (3)$$

式中, N 为信号采样长度。 $\hat{R}_{YY}(\tau)$ 是 $R_{YY}(\tau)$ 的渐进无偏估计, 且具有相容性和渐进正态分布等特点^[14]。根据式(3)估计系统随机响应的自相关函数, 进而可结合基于自由振荡响应的方法进行模式估计。

1.2 自然激励技术

NExT 最早应用于风机的模态测试中^[19], 随后在多个领域得到了大量应用研究。下面结合发电机运动方程对其原理进行介绍, 发电机采用二阶模型, 并在某一稳定运行点进行线性化, 得到

$$M\Delta\ddot{\delta}(t) + D\Delta\dot{\delta}(t) + K\Delta\delta(t) = F(t) \quad (4)$$

式中: $\Delta\delta(t)$ 为发电机功角增量; $F(t)$ 为系统随机激励; M 为惯性时间常数; D 为阻尼系数; K 为同步转矩系数。

以第 i 台发电功角增量 $\Delta\delta_i(t)$ 为参考信号, 对式(4)的两边分别右乘 $\Delta\delta_i(t)$ 并计算其期望, 则有

$$\begin{aligned} ME[\Delta\dot{\delta}(t)\Delta\delta_i(s)] + DE[\Delta\delta(t)\Delta\delta_i(s)] + \\ KE[\Delta\delta(t)\Delta\delta_i(s)] = E[F(t)\Delta\delta_i(s)] \end{aligned} \quad (5)$$

利用相关函数替代, 式(5)可改写为

$$MR_{\Delta\dot{\delta}\Delta\delta_i}(t, s) + DR_{\Delta\delta\Delta\delta_i}(t, s) + KR_{\Delta\delta\Delta\delta_i}(t, s) = R_{F\Delta\delta_i}(t, s) \quad (6)$$

式中, R 表示相关函数。

考虑平稳随机信号 $p(t)$ 、 $q(t)$, 其相关函数仅与 t 、 s 有关, 有等式(7)成立。

$$R_{pq}^{(m)}(\tau) = R_{pq}^{(m)}(\tau) \quad (7)$$

式中: $\tau = t - s$; $p^{(m)}$ 表示 $p(t)$ 对 t 的 m 次微分; $R_{pq}^{(m)}$

表示 R_{pq} 对 τ 的 m 次微分。

由于随机激励 $F(t)$ 与系统响应不相关, 式(6)中的 $R_{F\Delta\delta_i} = 0$; 根据式(7), 则式(6)可进一步表示为

$$M\ddot{R}_{\Delta\delta\Delta\delta_i}(\tau) + D\dot{R}_{\Delta\delta\Delta\delta_i}(\tau) + KR_{\Delta\delta\Delta\delta_i}(\tau) = 0 \quad (8)$$

上式的相关函数所满足的方程与机组功角增量的齐次微分方程一致, 即系统随机响应的互相关函数与系统自由振荡响应函数有相同的表达式, 因此, 可将自然激励技术用于电力系统低频振荡分析中, 计算系统两监测点随机响应的互相关函数作为系统自由响应进行低频振荡模式估计。

1.3 随机减量技术

RDT 是 20 世纪 70 年代提出的一种从结构随机响应获取自由衰减信号的有效方法, 其基本思想是建立在线性系统的叠加原理基础上的。如果随机响应信号是均值为零的平稳随机过程, 通过一定限制条件下的取样, 再通过时域平均, 可提取相当于某种初始条件下的自由响应信号^[17, 20], 即 RD 函数可以表示为

$$\hat{D}_{YY}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{r=1}^N y(t_r : t_r + \tau) \quad (9)$$

式中: t_r 是满足某种触发条件的信号截取点; τ 是截取长度。随机减量函数与响应相关函数之间的一般数学关系可表示为

$$\hat{D}_{YY}(\tau) = E[y(\tau) | y(t_r) = a] = \frac{R_{YY}(\tau)}{\sigma_Y^2} a \quad (10)$$

式中: σ_Y^2 是随机响应 y 的方差; a 为触发阈值。上式中随机减量函数和自相关函数之间是一个线性比例关系。图 1 是 RDT 对系统随机响应截取平均的示意图。

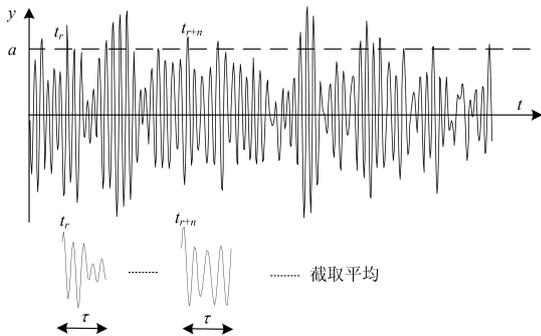


图 1 随机减量技术示意图

Fig. 1 Schematic diagram of random decrement technique

2 振荡模式参数估计

2.1 特征系统实现算法

在系统最小实现理论的基础上发展起来的特征

系统实现算法, 利用系统脉冲响应函数辨识得到系统状态空间模型^[21]。对于系统随机响应, 在提取系统自由振荡响应的基础上, ERA 利用估计的自由振荡响应构造 Hankel 矩阵, 采用奇异值分解技术得到系统的最小实现, 从而得到最小阶数的系统状态矩阵, 进一步可估计得到振荡模式参数。

设从随机响应中提取的系统自由振荡响应为 $h(k)$, 构造如下的 Hankel 矩阵

$$H(i-1) = \begin{bmatrix} h(i) & h(i+1) & \cdots & h(i+k-1) \\ h(i+1) & h(i+2) & \cdots & h(i+k) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ h(i+r-1) & h(i+r) & \cdots & h(i+r+k-2) \end{bmatrix} \quad (11)$$

式中: k 和 r 分别为行数和列数。

对 $H(0)$ 作奇异值分解, 得

$$H(0) = USV^T = [U_1 U_2] \begin{bmatrix} S_1 & 0 \\ 0 & S_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^T \\ V_2^T \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中: U 、 V 分别表示左、右奇异矩阵; S 是以奇异值为对角线元素的 $k \times r$ 矩阵。

奇异值按降序排列, 记为 $\sigma_1, \dots, \sigma_n, \sigma_{n+1}, \dots, \sigma_r$, 理论上系统状态矩阵的阶数 n 可由非零奇异值的个数来确定, 然而由于测量噪声或计算误差的影响, 对应于高阶的奇异值也不为零。本文通过计算 $\varepsilon = \sigma_n / \sigma_1$, 将 ε 大于设定阈值的 n 设定为系统阶数。通过对 Hankel 矩阵进行奇异值分解, ERA 实现了高阶噪声模式的剔除, 从而具有较好的抗噪性能。

系统状态矩阵可通过下式计算得到

$$A = S_1^{-1/2} U_1^T H(1) V_1 S_1^{1/2} \quad (13)$$

对矩阵 A 进行特征值分解, 计算特征值 z_i , 并转化至连续域:

$$s_i = \sigma_i \pm j\omega_i = \ln(z_i) F_s \quad (14)$$

式中, F_s 为采样频率。最后, 系统各个振荡模式的频率和阻尼比为

$$\begin{cases} f_i = \frac{\omega_i}{2\pi} \\ \zeta_i = \frac{-\sigma_i}{\sqrt{\sigma_i^2 + \omega_i^2}} \end{cases} \quad (15)$$

2.2 模式参数估计实现

基于系统随机响应的低频振荡模式估计主要包含以下步骤。

(1) 信号预处理: 收集随机负荷变化等小扰动激励的系统随机响应, 如母线相角等; 通过一阶差分及高通滤波去除低频段的稳态分量及缓慢变化趋

势, 采用 FIR 零相移滤波器低通滤波后以 10 Hz 的频率采样。

(2) 自由振荡响应估计: 分别利用 AC、RDT 及 NExT 估计系统自由响应。对于 NExT 方法, 先采用 Welch 法计算出监测点和参考点的随机响应的互功率谱, 再经傅里叶逆变换得到互相关函数。对于 RDT 方法, 实际应用中的触发条件将直接关系到样本平均次数, 进而影响 RD 函数估计的准确性。根据文献[17], 选择水平触发条件, 阈值 a 设为 σ_v^2 , 将落入阈值 a 正负 0.5% 区域内的数据点定为信号截取起始点。

(3) 低频振荡模式估计: 采用 ERA 辨识系统状态矩阵, 通常 Hankel 矩阵的列数设置为待估计模式数量的 8 倍, 行数由截取的自由振荡响应的长度确定; 确定系统阶数的阈值 ε 设定为 5%; 估计得到系统状态矩阵后, 通过特征值分析计算振荡模式的频率和阻尼比。

3 算例分析

3.1 四机两区域系统

四机两区域系统如图 2 所示, 系统模型参数见文献[22]。系统中负荷采用恒阻抗模型, 有功和无功负荷分别为 2734 MW 和 200 Mvar。系统正常运行状态下, 区域 1 向区域 2 传送的有功功率为 400 MW。通过特征值分析得到系统的区间振荡模式, 振荡频率为 0.5606 Hz, 阻尼比为 5%。为模拟实际电网的负荷变化等小幅随机扰动, 设置系统的各个负荷的 1% 容量按高斯白噪声变化, 进行蒙特卡洛仿真 200 次。每次仿真时间为 12 min, 收集发电机母线的电压相角信号, 加入 20 dB 高斯白噪声用于等效测量噪声的影响。

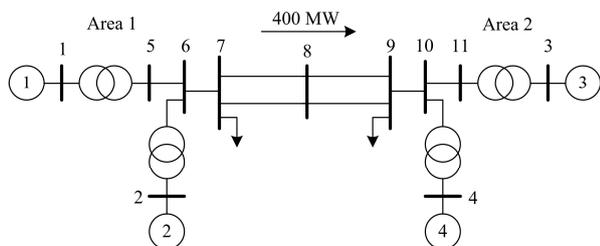


图 2 四机两区域系统

Fig. 2 Four-generator two-area system

由特征值分析右特征向量可知, 发电机 G3 的功角对系统的区间振荡模态具有最好的可观性, 因此文中利用母线 3 的电压相角随机响应来提取系统自由振荡响应。图 3 是预处理后的母线 3 的电压相角信号。对于 NExT 方法, 选取母线 4 的电压相角

信号作为参考信号。采用第 2 节介绍的低频振荡模式估计实现步骤, 分别利用 AC、NExT 及 RDT 三种方法从随机响应中提取系统自由振荡响应, 其归一化结果如图 4 所示。从图 4 可知, 三种方法估计的自由振荡响应非常接近, 下面结合 ERA 方法对振荡模式参数进行估计。

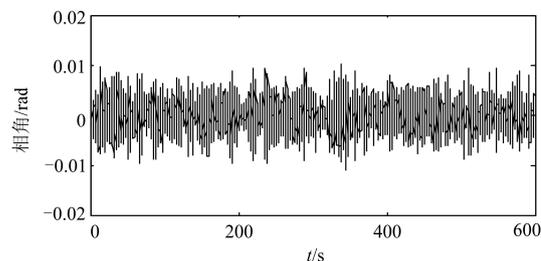


图 3 母线 3 的电压相角信号

Fig. 3 Voltage angle signal of bus 3

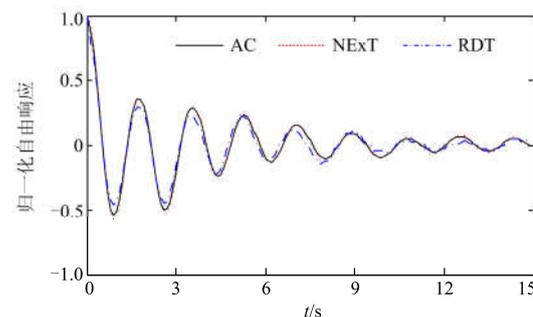


图 4 归一化的自由振荡响应

Fig. 4 Normalized free oscillation responses

为了从统计意义上对三种方法进行评估, 综合三种方法的各 200 组区间振荡模式估计结果, 分别计算模式频率、阻尼比的平均值及标准差。表 1 给出了不同时间窗长的模式参数估计结果, 可以看出三种方法估计的模式频率、阻尼比的均值和特征值分析结果基本吻合。随着时间窗长度的增加, 模式频率和阻尼比的标准差都逐渐减小。一般地, 增加模式估计的时间窗长度能够增加待估计模式的信息量, 进而提高模式参数的估计准确性。通常基于随机响应的模式估计的时间窗可取为 8~10 min, 使得模式估计结果既有较高的精度, 同时又能较好地跟踪系统模式参数的变化。

此外, 仔细对比表 1 中三种方法的模式估计结果, 可以发现与 RDT 方法相比, AC 与 NExT 方法的模式频率和阻尼比的估计结果有较小的标准差, 表明基于 AC 和 NExT 方法的模式估计结果更为准确, 利用 AC 和 NExT 方法从系统随机响应中提取自由振荡响应更加有效。

表 1 不同时间窗长的模式参数估计结果

Table 1 Estimation results of mode parameters with different length of time window

时间窗/ min	AC+ERA		NExT+ERA		RDT+ERA	
	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比
6	0.5611±	0.0516±	0.5614±	0.0516±	0.5616±	0.0528±
	0.0066	0.0112	0.0074	0.0118	0.0081	0.0139
8	0.5608±	0.0505±	0.5610±	0.0499±	0.5606±	0.0504±
	0.0062	0.0095	0.0064	0.0099	0.0068	0.0112
10	0.5612±	0.0502±	0.5613±	0.0499±	0.5612±	0.0504±
	0.0055	0.0091	0.0056	0.0094	0.0062	0.0103
12	0.5608±	0.0503±	0.5610±	0.0500±	0.5606±	0.0503±
	0.0052	0.0092	0.0051	0.0093	0.0059	0.0099

进一步测试分析不同噪声水平下三种方法的模式参数估计，随机响应的时间窗长设为 10 min，结果如表 2 所示。随着叠加的测量噪声强度的增加，随机响应的信噪比不断降低，模式参数估计结果的标准差缓慢增加，表明测量噪声对模式参数的估计准确性影响较小，在信号信噪比低至 5 dB 的情况下，模式参数估计结果仍具有较好的精度。同样，基于 AC 和 NExT 的模式估计方法性能相当，优于基于 RDT 的估计方法。

表 2 不同噪声水平的模式参数估计结果

Table 2 Estimation results of mode parameters with different noise levels

SNR/dB	AC+ERA		NExT+ERA		RDT+ERA	
	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比
30	0.5608±	0.0503±	0.5609±	0.0503±	0.5605±	0.0501±
	0.0052	0.0087	0.0054	0.0088	0.0058	0.0099
20	0.5612±	0.0502±	0.5613±	0.0499±	0.5612±	0.0504±
	0.0055	0.0091	0.0056	0.0094	0.0062	0.0103
10	0.5611±	0.0502±	0.5616±	0.0508±	0.5608±	0.0505±
	0.0059	0.0094	0.0061	0.0097	0.0068	0.0108
5	0.5595±	0.0507±	0.5612±	0.0497±	0.5586±	0.0494±
	0.0065	0.0099	0.0066	0.0099	0.0073	0.0111

为了考察振荡模式的阻尼比大小对模式估计结果的影响，保持区间振荡模式的频率不变，通过调整系统模型参数，如发电机阻尼系数、励磁器的电压增益等，使得模式阻尼比分别为 1%、5%、10%，分别对应振荡模式的低、中、高三种阻尼状态。不同阻尼条件下的模式参数估计结果如表 3 所示。从表中可以看出：随着模式阻尼比的变大，模式参数估计结果的标准差也随之增大；虽然三种方法得到的模式估计结果存在一定差异，对比三组不同阻尼条件下的模式估计结果，不难发现较低阻尼比的振荡模式的估计结果更加准确，这与文献[11]中的现象是吻合的。在模式频率一定的情况下，模式阻尼

比越小，振荡幅值衰减越慢，因此系统随机响应中包含更多的振荡模式信息，从而模式参数的估计结果更加准确。

从表 3 还可以看出：在较低阻尼比时，三种方法的模式估计结果的精度基本相当；而在较高阻尼比时，相对于自 AC 和 NExT 方法，基于 RDT 方法的模式估计结果的偏差与标准差偏大。因此，基于 RDT 的估计方法更适用于弱阻尼的模式参数估计，而基于 AC 和 NExT 的估计方法则具有更好的适应性。

表 3 不同阻尼条件下的模式参数估计结果

Table 3 Estimation results of mode parameters under different damping conditions

阻尼比/ %	AC+ERA		NExT+ERA		RDT+ERA	
	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比	频率/Hz	阻尼比
1	0.5600±	0.0109±	0.5600±	0.0114±	0.5600±	0.0104±
	0.0015	0.0027	0.0016	0.0028	0.0016	0.0029
5	0.5612±	0.0502±	0.5613±	0.0499±	0.5612±	0.0504±
	0.0055	0.0091	0.0056	0.0094	0.0062	0.0103
10	0.5603±	0.1010±	0.5611±	0.0992±	0.5620±	0.0987±
	0.0093	0.0183	0.0101	0.0190	0.0114	0.0210

本小节利用 AC、NExT 及 RDT 三种方法提取得到单通道自由振荡响应，并结合 ERA 方法对比分析了振荡模式估计的性能。ERA 方法能够对多通道自由振荡响应进行分析，接下来在 10 机 39 节点新英格兰系统中测试三种模式估计方法在多个区间振荡模式估计方面的有效性。

3.2 新英格兰系统

在图 5 所示的 10 机 39 节点新英格兰系统中，通过蒙特卡洛仿真模拟系统真实运行情况。系统中发电机采用 4 阶模型，除发电机 G1 外，其他发电

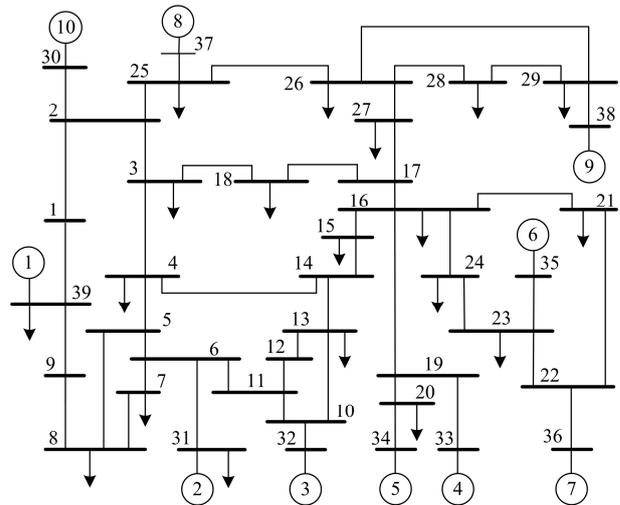


图 5 新英格兰系统单线图

Fig. 5 One-line diagram of New England system

机配置了 IEEE2 型励磁器, 负荷采用恒阻抗模型。通过特征值分析可知, 新英格兰系统包含 3 个区域振荡模式, 其振荡振型的归一化幅值如图 6 所示。模式 1 是发电机 G1 对系统其余机组的振荡, 模式 2 是发电机 G5 对发电机 G9 的振荡, 模式 3 则是发电机 G2、G3 对发电机 G5 和 G9 的振荡。

在新英格兰系统中通过蒙特卡洛仿真 200 次, 模拟随机负荷波动的系统正常运行状态, 每次仿真时长设为 10 min, 收集得到 200 组发电机母线的电压相角信号。为了保证对三个区间振荡模式都具有较好的可观性, 以便同时准确地对三个模式进行估计, 根据图 6 的振荡振型幅值图, 选择 G2、G3、G5 和 G9 的发电机母线相角用于振荡模式估计。先利用 AC、NExT 及 RDT 三种方法从各通道随机响应中提取自由振荡响应, 其中选取 G5 的母线电压相角信号作为 NExT 方法的参考信号; 然后, 利用估计的多通道自由振荡响应构造 Hankel 矩阵, 并通过 ERA 方法估计振荡模式参数。

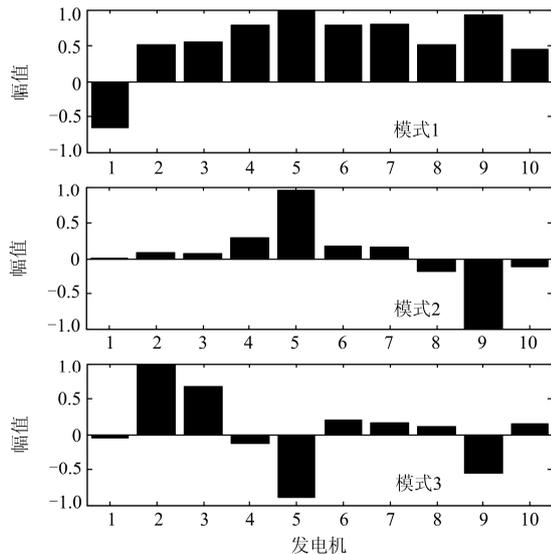


图 6 三个区间振荡模式的振型幅值

Fig. 6 Mode shape amplitude of three oscillation modes

新英格兰系统中的三个区间振荡模式的估计结果如表 4 所示, 同时表中给出了模式参数真实值。从表中可以看出, 三种方法的模式参数估计结果均值与特征值分析结果基本吻合, 表明三种方法能够从多通道随机响应中提取自由振荡响应, 从而有效估计系统多个区间振荡模式。通过系统随机响应的功率谱分析可知, 模式 1 对应功率谱的峰值最大, 因此模式 1 的估计结果的标准差最小, 模式参数的准确性最高。

表 4 三种方法的模式估计结果

Table 4 Mode estimation results for three methods

	真实值	AC+ERA	NExT+ERA	RDT+ERA	
模式 1	频率/Hz	0.5720	0.5724± 0.0031	0.5725± 0.0032	0.5730± 0.0036
		0.0286	0.0293± 0.0064	0.0295± 0.0067	0.0292± 0.0069
	阻尼比				
模式 2	频率/Hz	0.9538	0.9543± 0.0108	0.9527± 0.0123	0.9531± 0.0110
		0.0350	0.0341± 0.0106	0.0363± 0.0120	0.0335± 0.0107
	阻尼比				
模式 3	频率/Hz	1.0287	1.0272± 0.0117	1.0298± 0.0169	1.0290± 0.0134
		0.0317	0.0301± 0.0132	0.0348± 0.0142	0.0377± 0.0178
	阻尼比				

对比三种方法的模式估计结果可知, 基于 AC 的估计方法比基于 NExT 及 RDT 的方法估计准确性更好。需要指出的是, NExT 方法中的参考信号选择对模式估计的准确性有一定影响。由于发电机 G5 对于新英格兰系统的三个区间振荡模式都有较好的参与度, 因而选择 G5 的母线相角信号作为参考信号。大量仿真测试表明, 当选择其他通道信号作为参考信号时, 基于 NExT 方法的蒙特卡洛分析中出现很多无效估计结果, 因此在利用 NExT 方法分析多通道随机响应时, 同时估计多个振荡模式时需要着重注意参考信号的选择。相对而言, 基于 AC 的估计方法不存在参考信号的限制, 具有更好的鲁棒性。

4 结论

对比分析了基于 AC、NExT 和 RDT 三种方法在从系统随机响应中提取自由振荡响应的应用, 并结合 ERA 方法对低频振荡模式参数进行估计。通过四机两区域系统和新英格兰系统的蒙特卡洛仿真, 从统计意义上评估分析了模式频率和阻尼比的估计结果, 得出了以下结论:

- (1) 低频振荡模式参数的估计精度随着随机响应时间窗长的增加而提高; 测量噪声对模式参数的估计准确性影响较小。
- (2) 随着模式阻尼比的减小, 振荡模式参数估计结果的标准差逐渐降低; 基于 AC、NExT 和 RDT 的三种方法对弱阻尼模式的估计精度非常接近。
- (3) 总体上, 基于 AC 的估计方法的模式估计精度优于基于 NExT 和 RDT 的估计方法, 具有较好的鲁棒性和适应性。

参考文献

- [1] 顾丽鸿, 周孝信, 严剑峰, 等. 特高压联网区域实时小干扰稳定分析策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 1-7.
GU Lihong, ZHOU Xiaoxin, YAN Jianfeng, et al. Real time small signal stability analysis of power systems interconnected by ultra high voltage transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 1-7.
- [2] 梁志飞, 肖鸣, 张昆, 等. 南方电网低频振荡控制策略探讨[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 54-63.
LIANG Zhifei, XIAO Ming, ZHANG Kun, et al. Discussion on control strategy for low frequency oscillation in China Southern Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 54-63.
- [3] 程浩, 冯艳虹, 张道农, 等. 蒙西电网动态稳定问题分析及稳定措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 137-143.
CHENG Hao, FENG Yanhong, ZHANG Daonong, et al. Analysis of dynamic stability issues of West Inner Mongolia power grid and research on its control measures[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 137-143.
- [4] ZHAO Jinqun, ZHANG Yujie, ZHANG Pan, et al. Development of a WAMS based test platform for power system real time transient stability detection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 11pp.
DOI 10.1186/s41601-016-0013-1
- [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): 59-63.
JU Ping, XIE Huan, MENG Yuanjing, et al. Online identification of low-frequency oscillations based in wide-area measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 59-63.
- [6] 李安娜, 吴熙, 蒋平, 等. 基于形态滤波和 Prony 算法的低频振荡模式辨识的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 137-142.
LI Anna, WU Xi, JIANG Ping, et al. Research on identifying low frequency oscillation modes based on morphological filtering theory and Prony algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 137-142.
- [7] 王宇静, 于继来. 电力系统振荡模态的矩阵束辨识法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 12-17.
WANG Yujing, YU Jilai. Matrix pencil method of oscillation modes identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 12-17.
- [8] 雷强, 刘光晔, 朱永强, 等. 基于 EEMD 和矩阵束算法的低频振荡主导模式识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 56-62.
LEI Qiang, LIU Guangye, ZHU Yongqiang, et al. Identification of the dominant mode based on EEMD and matrix pencil algorithm for low frequency oscillations[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 56-62.
- [9] SANCHEZ-GASCA J J, CHOW J H. Performance comparison of three identification methods for the analysis of electromechanical oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 995-1002.
- [10] HENICHE A, KAMWA I. Assessment of two methods to select wide-area signals for power system damping control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 572-581.
- [11] 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 Transactions on Power Systems, 2003, 18(1): 167-182.
- [12] 吴超, 陆超, 韩英铎, 等. 计及模型定阶的低频振荡模式类噪声信号辨识[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 1-6.
WU Chao, LU Chao, HAN Yingduo, et al. Power system oscillation modes estimation based on ambient signals considering model order selection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 1-6.
- [13] TURUNEN J, THAMBIRAJAH J, LARSSON M, et al. Comparison of three electromechanical oscillation damping estimation methods[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 2398-2407.
- [14] 杨叔子, 吴雅, 轩建平. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2007.
- [15] SEPPÄNEN J M, TURUNEN J, KOIVISTO M, et al. Modal analysis of power systems through natural excitation technique[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1642-1652.
- [16] 王祥超, 张鹏, 甄威, 等. 基于自然激励技术和 TLS-ESPRIT 方法的低频振荡模式辨识[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(10): 75-80, 130.

- WANG Xiangchao, ZHANG Peng, ZHEN Wei, et al. Identification of low frequency oscillation modes based on NExT and TLS-ESPRIT algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(10): 75-80, 130.
- [17] 吴超, 曹广忠. 基于随机减量技术和Prony方法的低频振荡类噪声辨识[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 53-58.
- WU Chao, CAO Guangzhong. Low frequency oscillation ambient signals identification based on random decrement technique and Prony method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 53-58.
- [18] PIERRE J W, TRUDOWSKI D J, DONNELLY M K. Initial results in electromechanical mode identification from ambient data[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(3): 1245-1251.
- [19] HERMANS L, VENDER A H. Modal testing and analysis of structures under operational conditional: industrial applications[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 1999, 13(2): 193-216.
- [20] 申建红, 李春祥, 李锦华. 基于 RDT 和 WT 方法识别超高层建筑的模态参数[J]. 振荡与冲击, 2009, 28(6): 66-70.
- SHEN Jianhong, LI Chunxiang, LI Jinhua. Identifying modal parameters of super tall buildings based on RDT and WT methods[J]. Journal of Vibration and Shock, 2009, 28(6): 66-70.
- [21] CAICEDO J M, DYKE S J, JOHNSON E A. Natural excitation technique and eigensystem realization algorithm for phase I of the IASC-ASCE benchmark problem: simulated data[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2004, 130(1): 49-60.
- [22] KUNDER P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
-
- 收稿日期: 2016-11-01; 修回日期: 2017-01-22
- 作者简介:
- 杨健维(1983—), 女, 博士, 副教授, 研究方向为新能源电力系统保护与控制、城市电网安全预警、电动汽车并网;
- 贾勇(1986—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向为广域测量、电力系统运行与控制; E-mail: yongjgy@hotmail.com
- 何正友(1970—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为信号处理和信息理论在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配网综合自动化等。
- (编辑 姜新丽)