

Analysis of the Mechanism of Electromechanical Oscillations for Power System under Random Excitation

Jintao Jiang

School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin Jilin
Email: dy0101232@163.com

Received: June 2nd, 2019; accepted: June 17th, 2019; published: June 24th, 2019

Abstract

There is a wealth of dynamic information hidden in system responses which are subject to the random excitations. On the basis of the stochastic differential algebraic equations and features of random excitations, by linearizing the equations, this paper derives the analytical expressions of the power system dynamic response under random excitation. So we mathematically prove the presence of power oscillation characteristics in power ambient data. It reveals the basic mechanism of system oscillation characteristics by using ambient signals. Based on the case of small fluctuations caused by random changes of loads of IEEE-four generators two areas system, comparing the identified parameters with theoretical characteristic parameters and analysis of the results of probability distributions, we conclude that it is feasible and effective to identify the oscillation characteristics by using the ambient data. Our work further reinforces the theoretical basis of the oscillation characteristics identification on the basis of the ambient signal.

Keywords

Random Excitation, Low Frequency Oscillation, Ambient Signal, Mode Parameters

随机激励作用下电力系统机电振荡机理解析

姜锦涛

东北电力大学电气工程学院, 吉林 吉林
Email: dy0101232@163.com

收稿日期: 2019年6月2日; 录用日期: 2019年6月17日; 发布日期: 2019年6月24日

摘要

随机激励作用下的电力系统响应中蕴含着丰富的动态信息。本文以随机微分方程和电力系统随机激励特

征为基础,通过对电力系统随机微分-代数方程的线性化,推导了随机激励下电力系统动态响应的解析形式,从数学角度证明了机电振荡特征在电力系统随机响应中的存在性,揭示了利用随机激励作用下系统响应提取系统振荡特征的基本机理。以负荷随机激励下IEEE四机两区域系统响应数据及某区域电网扰动录波数据为例,通过与理论振荡特征参数的比较及对概率统计结果的分析,探讨了利用随机响应识别系统机电振荡特征的正确性,进一步夯实了基于随机响应电力系统振荡特征辨识的理论基础。

关键词

随即激励,低频振荡,环境响应信号,模态参数

Copyright © 2019 by author and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着电力系统规模的不断扩大,低频振荡已成为各国电网普遍存在的问题[1]。低频振荡的发生严重影响电力系统的安全稳定运行,使得电力系统低频振荡问题一直受到国内外专家学者的关注[2]。

目前,电力系统低频振荡分析方法主要可以分为两类。第一类是以特征分析法为基础的静态分析法,该类方法通过计算在运行点处线性化的系统状态方程特征值来分析自然振荡问题[3]。由于该类方法需要计算状态矩阵特征值,对于高维系统存在维数灾问题,已很难适应规模及模型复杂度不断提高的现代电力系统。随着以PMU为代表的先进量测装置在电力系统中的广泛应用,基于量测信息的低频振荡分析方法成为研究热点[4][5]。该类方法多以扰动录波数据为基础,利用现代信号分析工具提取系统振荡特征,虽然该类分析方法过程简单,结果准确度高,但所需数据需要扰动激发,且结果单一,不能覆盖系统全部振荡模式,无法实现对系统低频振荡特性的全面评估。近年来,以随机响应数据为基础的低频振荡分析方法受到了学术界和工程界的广泛关注,文献[6][7][8][9]分别利用TLS-ESPRIT法、自适应递归随机子空间法、频域分解法、子空间法等从系统随机响应数据中提取出了与理论值较为接近的自然振荡信息。现有文献对基于随机响应的低频振荡分析均集中于提取方法的研究,而忽略了对随机激励作用下电力系统自然振荡机理的研究,未从根本上对随机响应的本质进行深入的研究和分析。

随机作用是自然界各个物理系统中普遍存在的现象,为了计算和分析随机激励下系统动态过程,在传统微分方程的基础中引入随机变量,建立了随机微分方程[10]。Federico Milano等人将随机微分方程引入电力系统中,计算分析了不同随机激励下电力系统的动态过程[11]。本文以文献[11]提出的电力系统随机微分代数方程为基础,通过对电力系统随机微分-代数方程的线性化,推导了随机激励下电力系统动态响应的解析形式,从而揭示了电力系统自然振荡与随机响应之间的内在联系,并利用IEEE四机两区域系统及实际电力系统量测数据对所提理论的正确性进行了验证。

2. 电力系统动态响应

根据扰动源的不同,电力系统动态响应可以分为暂态响应和随机响应。暂态响应主要是在电力系统遭受如短路、发电机或输电线路退出运行等大扰动后系统状态变量的动态过程,暂态响应的特征表现为波动幅值大、持续时间短的特点。随机响应是电力系统正常运行状态下,由于负荷、新能源有功输出等小幅随机性波动引起系统状态变量的无规律的随机动态过程,随机响应的特征主要表现为波动幅值小,近似噪声,实时存在,如图1所示。

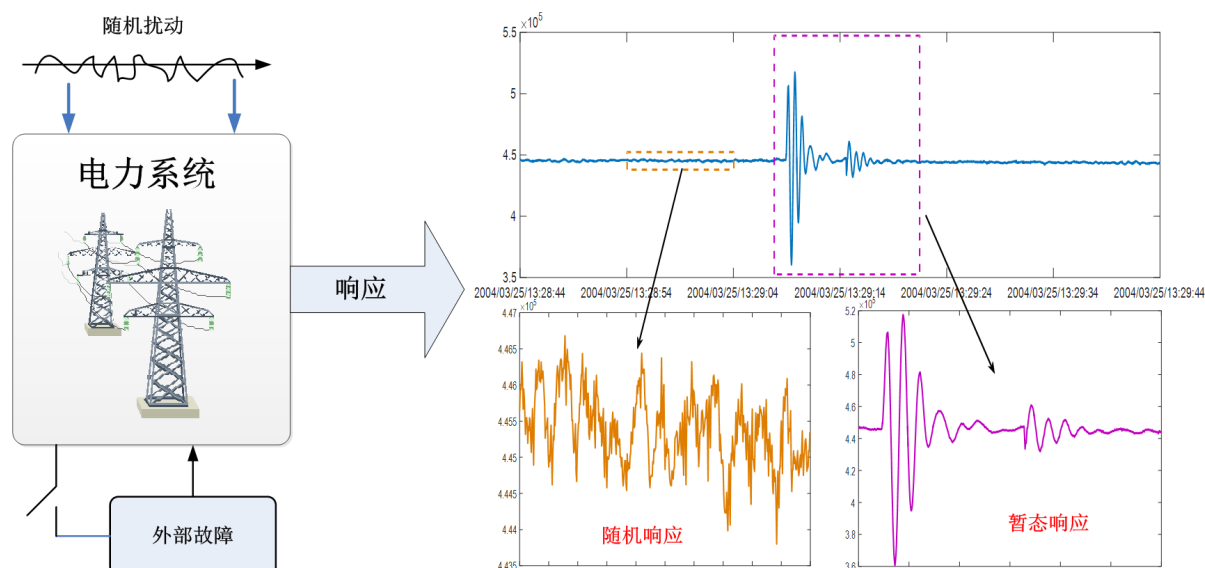


Figure 1. Power system response type

图 1. 电力系统动态响应分类

暂态过程为特定扰动激发出的动态响应，响应特征与扰动地点、方式及持续时间直接相关，暂态响应所蕴含信息只适合于分析特定扰动所激发出的振荡过程，由于其持续时间短，使得分析结果具有较大的局限性，一般只适用于事故后分析。

随机响应为系统实时存在的动态过程，由于波动幅值小，通常被淹没于信号噪声中，使得其动态过程近似噪声过程，亦称类噪声过程。随机响应过程并未发生实质性功率振荡，系统振荡特征隐含于类似噪声的随机响应信号中，对于分析系统潜在风险具有重要的价值。由于仅利用量测信息，而无需构建复杂元件及高维系统模型，使得基于随机响应的电力系统振荡特征提取与分析的优势突显，基于随机响应的电力系统振荡特征分析方法取得了理想的效果。

3. 随机激励下电力系统响应的数学解析

通常情况下，电力系统动态模型一般用如下的微分代数方程形式描述[3]：

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ 0 = g(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

$$0 = g(x, y) \quad (2)$$

式(1)为系统微分方程，描述了系统中发电机及相应的控制装置、负荷等的动态过程，式(2)为系统的代数方程，一般由系统潮流方程及发电机、励磁器、调速器、负荷等静态方程组成。 f 和 g 为连续函数； x ($x \in R^n$) 为系统的状态变量，如发电机功角，转子角速度等， y ($y \in R^m$) 为系统的代数变量，如母线电压，母线相角等。

实际运行过程中，负荷波动、新能源有功输出随机性均会给系统带来随机扰动。以负荷随机波动为例，其随机过程主要通过潮流方程的变化作用于发电机及其控制器的状态变量，用随机微分代数方程可以描述为[11]：

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y) \\ 0 = g(x, y, u) \end{cases} \quad (3)$$

$$0 = g(x, y, u) \quad (4)$$

式中， u 为负荷随机波动变量。

假设负荷随机波动服从(Ornstein-Uhlenbeck, OU)分布, 建立负荷随机波动的系统动态模型:

$$\dot{u} = -Cu + \delta\xi \quad (5)$$

式中: C 为 t_{corr}^{-1} 组成的对角阵的对角线元素, t_{corr} 为负荷随机波动过程的相关时间; δ 为系统噪声强度; ξ 为独立的高斯随机分布向量。

式(3)、(4)、(5)共同构成了负荷随机波动下的电力系统随机微分-代数方程(Stochastic Differential Algebraic Equation, SDAE)。

随机扰动过程中, 电力系统运行状态未发生变化, 即各台发电机运行平衡点不变, 则可以通过线性化系统状态来近似分析系统状态变量的动态过程。线性化式(4)有:

$$\Delta y = \begin{bmatrix} -g_y^{-1}g_x & -g_y^{-1}g_u \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta u \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中, g_x , g_y , g_u 分别为等式(4)中与变量 x , y , u 对应的雅可比矩阵。

线性化式(3)和(5), 并将式(6)代入, 消除变量 y 得:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{x} \\ \Delta \dot{u} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x - f_y g_y^{-1} g_x & -f_y g_y^{-1} g_u \\ 0 & -C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta u \end{bmatrix} + \delta \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n_u} \end{bmatrix} \xi \quad (7)$$

式中: f_x , f_y 分别为式(3)中对应于 x , y 的雅可比矩阵。

若令 $z = [\Delta x \quad \Delta u]^T$, $A = \begin{bmatrix} f_x - f_y g_y^{-1} g_x & -f_y g_y^{-1} g_u \\ 0 & -C \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} 0 \\ I_{n_u} \end{bmatrix}$, 则式(7)可表示为:

$$\dot{z} = Az + \delta B\xi \quad (8)$$

式(8)即为负荷随机波动下, 电力系统的线性化状态空间模型。

令 $|A - \lambda I| = 0$, 可计算出系统 n 个振荡模式对应的特征值 $\lambda_i = \sigma_i + j\omega_i$ ($i = 1, 2, \dots, n$), 则系统状态变量的时域解析表达式为:

$$z(t) = \sum_{i=1}^n v_i u_i^T z(0) e^{\sigma_i t} \sin(\omega_i t + \varphi_i) + \delta B\xi \quad (9)$$

式(9)中, 负荷随机波动下系统响应由振荡分量和随机分量两部分构成。通常情况负荷随机波动幅值相对较小, 加之系统中快速励磁、PSS 及调速器等控制器的作用, 系统状态变量振荡分量幅值亦非常小, 常常被淹没在噪声中, 使得测量得到的有功功率、电压、频率等系统随机响应的外在表象为杂乱无章的类噪声信号。式(9)从数学角度证明了电力系统随机响应中含有的机电振荡特征信息, 通过对式(9)的分析不难发现, 看似无章可循的随机响应实际上是随机扰动驱动下系统动态响应与量测噪声叠加后的类噪声信号, 其中蕴含着丰富的系统动态特征。

利用随机响应提取系统动态特征, 避免了繁杂的系统建模及模型参数辨识过程, 仅依赖于量测信息即可实现对电网当前运行状态的感知, 发现潜在的安全威胁, 为保证电网安全稳定运行提供依据。

4. 实验结果与分析

本文以如图 2 所示的 IEEE 四机两区域为例进行计算和分析, 数据参见文献[3]。首先利用小干扰稳定分析算法(SSAT, Small Signal Analysis Stability)提取基础运行方式下系统机电振荡模式, 共计算得到 1 个区域间振荡模式, 两个本地振荡模式, 结果如表 1 所示。

三个机电模式对应的振荡模态如图 3 所示。

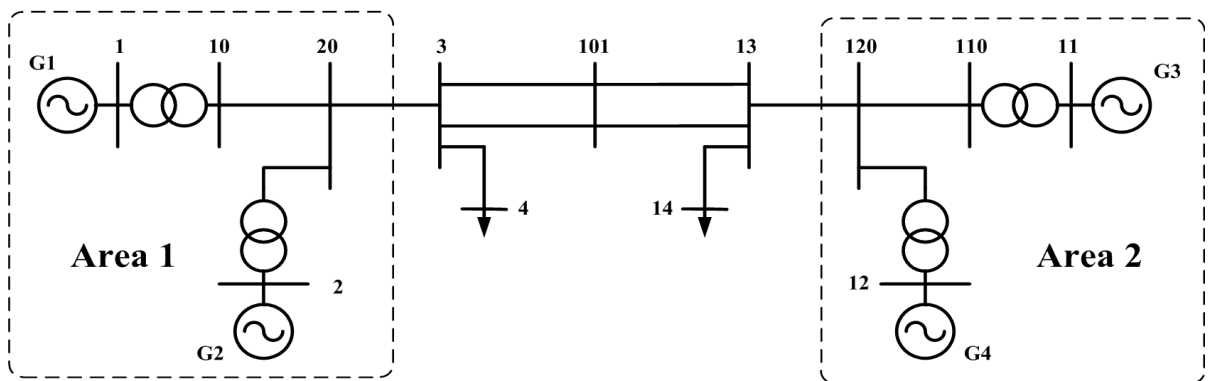


Figure 2. The one-line diagram of four generators two area
图 2. 4 机 2 区域系统接线

Table 1. The characteristic results of four generators two area
表 1. 4 机 2 区域系统特征值分析结果

模式	频率/Hz	阻尼比/%	模态
1	0.6322	1.68	G1 & G2 vs. G3 & G4
2	1.1856	11.85	G1 vs. G2
3	1.1947	11.18	G3 vs. G3

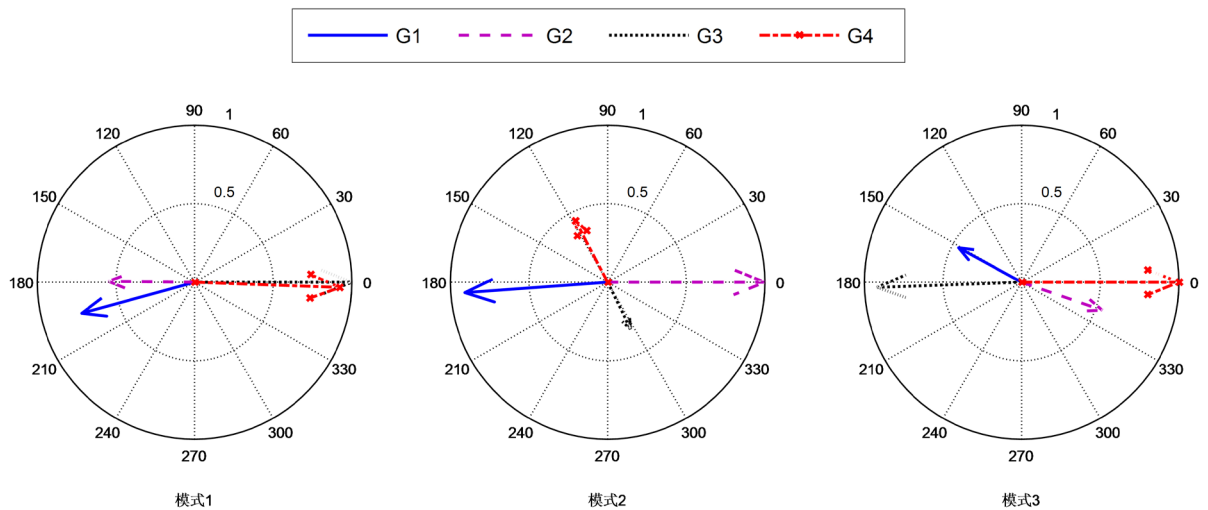


Figure 3. Modal graph of four generators two area
图 3. 4 机 2 区域系统振荡模态图

假设节点 4 及节点 14 处负荷以基础值的 5%随机波动，利用电力系统时域仿真软件获取系统随机响应，如图 4 和图 5 所示。400 秒时长的各发电机有功输出及联络线有功的统计结果如表 2 所示。

基础运行方式中，四台发电机有功输出分别为：7.2611 MW、7.0 MW、7.0 MW、7.0 MW，负荷随机波动下各发电机有功输出的统计均值分别为：7.1493 MW、6.8882 MW、6.9857 MW、6.8989 MW，统计均值与基础运行方式值十分接近，近似相等；同时，联络线有功传输功率及其统计均值分别为 4.1610MW 和 4.1929 MW，同样近似相等。由此可以看出，在波动幅值很小的随机扰动驱动下，系统运行方式基本维持不变，在无新设备投运的前提下，系统动态特征不会发生本质变化，振荡特性与基础运行方式近似相同。

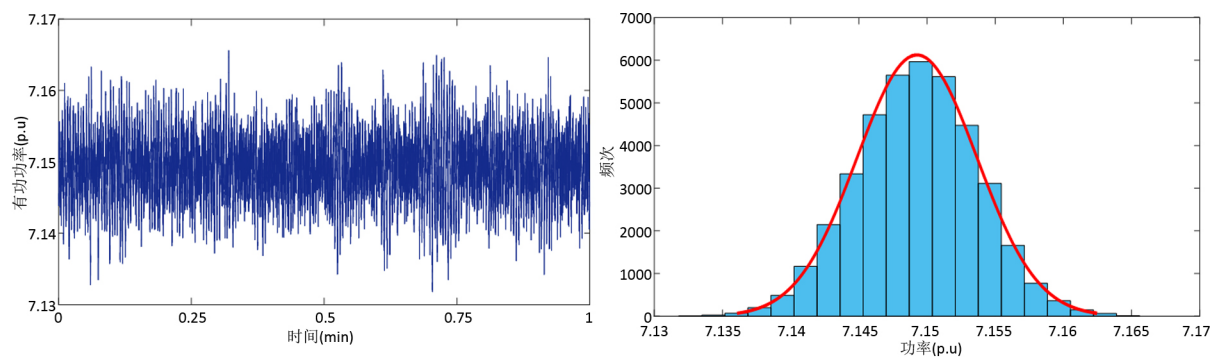


Figure 4. The response and probability distribution of active power of generator 1

图 4. 发电机 1 出口有功功率时域响应及其概率分布

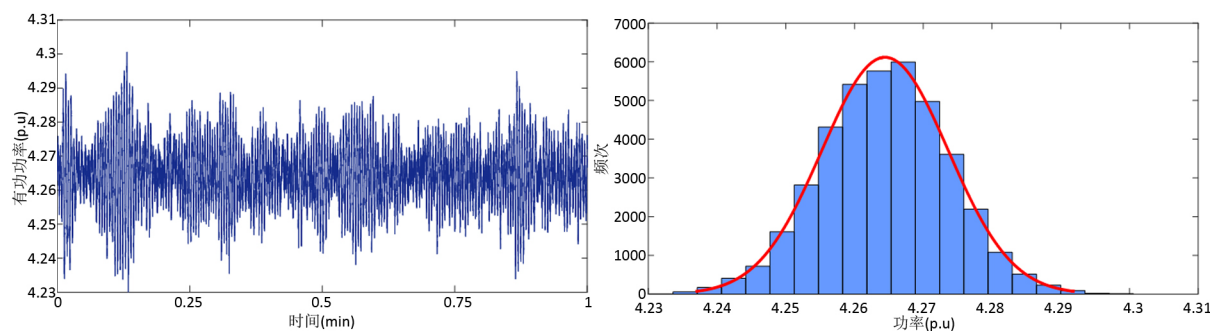


Figure 5. The response and probability distribution of active power of inter area connected line

图 5. 区间联络线有功功率时域响应及其概率分布

Table 2. The statistical results of active power of four generators and connected line

表 2. 发电机有功输出及联络线有功统计结果

有功	标准差	均值	基础值
G1	0.0044	7.1493	7.2611
G2	0.0051	6.8882	7.0000
G3	0.0068	6.9857	7.0000
G4	0.0073	6.8989	7.0000
联络线	0.0124	4.1929	4.1610

以各台发电机电角速度的随机响应数据为基础,利用随机子空间辨识算法[12] [13]获取系统虚拟状态矩阵及观测矩阵,进而计算特征值并求取振荡频率及阻尼比。选取时长为 1 min 的窗口数据作为计算输入,每 10 s 滑动一次计算窗口数据,60 min 内的计算统计结果如表 3 所示。对比表 2 及表 3,三种模式的振荡频率及阻尼比的统计均值与基础运行方式的机电振荡参数十分接近,且方差较小,表明随机响应数据中蕴含的机电振荡信息能够反映系统的真实机电振荡特性(图 6~图 8)。

Table 3. The identification results of four generators two area

表 3. 4 机 2 区域系统辨识结果

模式	频率/Hz			阻尼比/%		
	SSAT	均值	标准差	SSAT	均值	标准差
1	0.6322	0.5808	0.0214	1.68	1.94	0.91
2	1.1856	1.1752	0.0852	11.85	11.37	2.85
3	1.1947	1.2175	0.0555	11.18	11.55	3.57

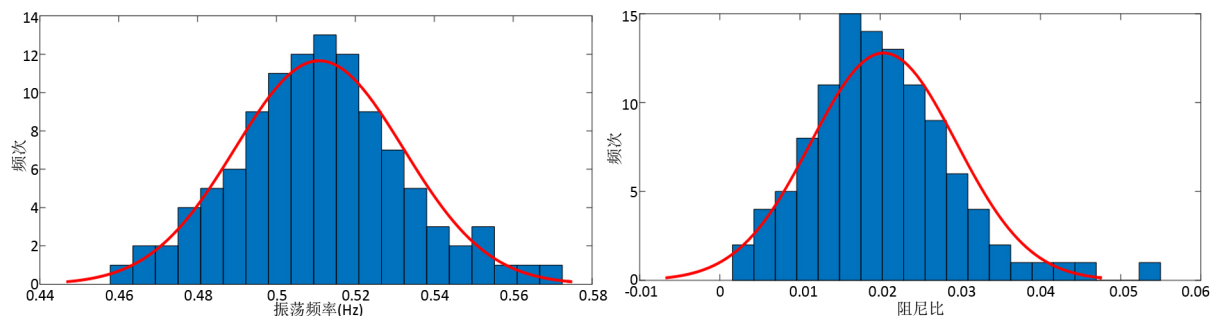


Figure 6. The probability distributions of identification results of interarea mode

图 6. 区间振荡频率及阻尼比辨识结果的概率分布

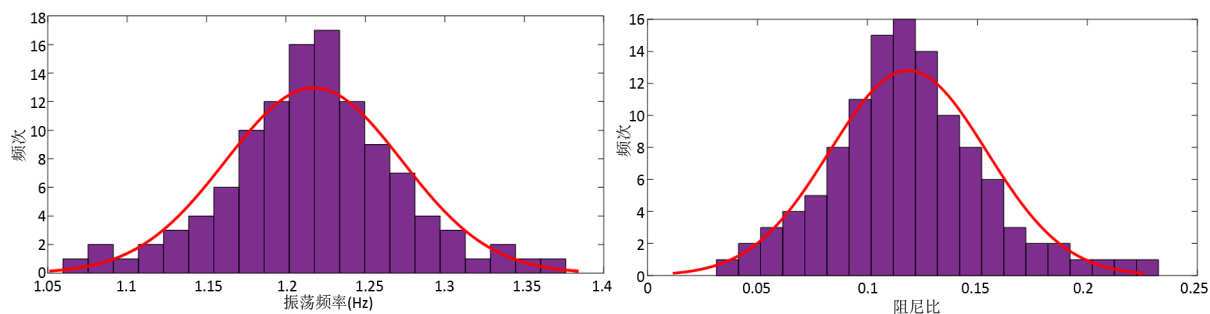


Figure 7. The probability distributions of identification results of local mode

图 7. 局部振荡频率及阻尼比辨识结果的概率分布

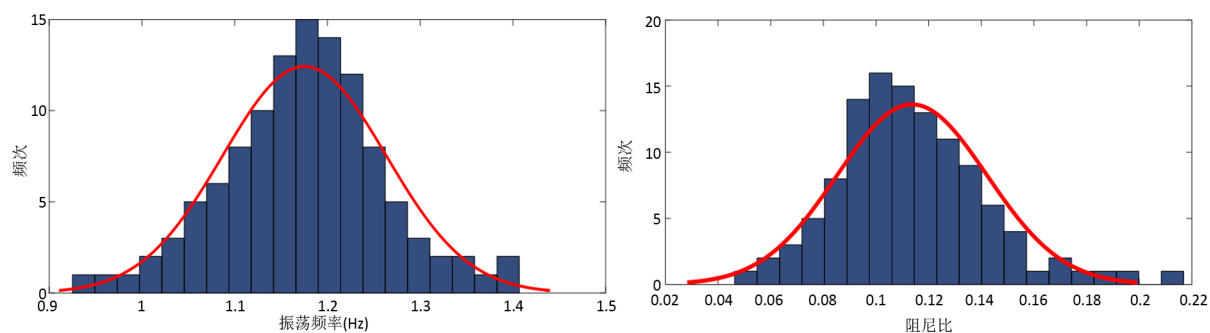


Figure 8. The probability distributions of identification results of local mode

图 8. 局部振荡频率及阻尼比辨识结果的概率分布

同时, 如图 9 所示的基于随机响应数据的振荡模态图反映的机组参与信息与图 3 所示的振荡模式相同, 进一步验证了本文机理分析的正确性。

5. 结论

以随机代数 - 微分方程为基础, 构建了随机激励下系统状态变量响应的解析表达式, 从数学的角度对随机激励驱动下系统的振荡机理进行了解释。计算与分析结果表明:

- 1) 随机激励下系统基本运行方式维持不变, 在无新设备投运的前提下系统保持原有动态特征;
- 2) 采用合适的辨识技术能够从随机相应数据中提取出系统机电振荡参数, 所提取参数及各机电振荡模态表征与基础运行方式吻合;

3) 实测数据分析结果表明基于随机响应数据的机电振荡特征识别对电力系统小干扰稳定在线量化评估具有重要的指导意义;

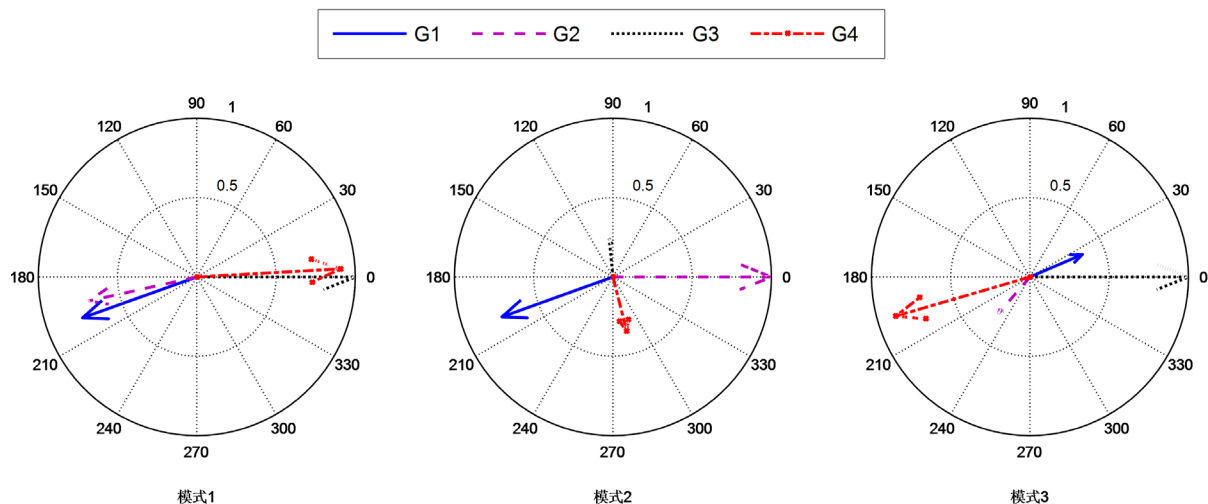


Figure 9. Mode shape identification results of four generators two area

图 9. 4 机 2 区域系统模态辨识结果

本文只是对电力系统随机响应数据机理及基本应用的初步探索，如何深入挖掘随机响应数据蕴含的动态信息，指导电力系统运行是作者下一步需要集中解决和攻克的问题。

参考文献

- [1] Kundar, P., Paserba, J., Ajarapu, V., et al. (2004) Definition and Classification of Power System Stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, **19**, 1387-1401. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2004.825981>
- [2] 余贻鑫, 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.
- [3] 蔡国伟, 王丽馨, 杨德友. 环境激励下基于频域特征的扰动源定位方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(6): 144-151.
- [4] Kunder, P. (1944) Power System Stability and Control. McGraw-Hill, New York.
- [5] Pierre, J., Trudnowski, D. and Canizares, C. (2012) Identification of Electromechanical Modes in Power Systems. IEEE Task Force Report.
- [6] 杨德友, 蔡国伟, 陈家荣. 基于动态响应的机电振荡特征识别与能控性评估方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 54-60.
- [7] 杨德友, 王文嘉, 高际惟, 王丽馨, 蔡国伟. 随机数据驱动下的机电振荡参数在线提取与阻尼调制(一): 基于ORSSI的模态参数在线辨识[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(8): 2253-2261+2535.
- [8] Praveen, T., Srivastava, S.C. and Singh, S.N. (2011) A Modified TLS-ESPRIT-Based Method for Low-Frequency Mode Identification in Power Systems Utilizing Synchrophasor Measurements. *IEEE Transactions on Power Systems*, **26**, 719-727. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2010.2055901>
- [9] Nezam Sarmadi, S.A. and Vaithoanathan, V. (2014) Electromechanical Mode Estimation Using Recursive Adaptive Stochastic Subspace Identification. *IEEE Transactions on Power Systems*, **29**, 349-358. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2281004>
- [10] Liu, G. and Venkatasubramanian, V.M. (2008) Oscillation Monitoring from Ambient PMU Measurements by Frequency Domain Decomposition. *IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, Seattle, 18-21 May 2008, Vol. 27, 2821-2824.
- [11] Zhou, N., Pierre, J.W. and Hauer, J.F. (2006) Initial Results in Power System Identification from Injected Probing Signals Using a Subspace Method. *IEEE Transactions on Power Systems*, **21**, 1296-1302. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2006.879292>
- [12] Bernt, K. (2003) Stochastic Differential Equations. 6th Edition, Springer Press, New York.
- [13] Fedetico, M. and Rafacel, Z. (2013) A Systematic Method to Model Power Systems as Stochastic Differential Algebraic Equations. *IEEE Transactions on Power Systems*, **28**, 4537-4544. <https://doi.org/10.1109/TPWRS.2013.2266441>

知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2333-5394, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: jee@hanspub.org