

工况模态分析在低频振荡辨识中的应用初探

陈卓

(贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003)

摘要: 工况模态分析是结构动力学工程模态辨识的前沿课题, 初步探讨了这一概念应用于电力系统低频振荡特性在线辨识的可能性。论述了电力系统低频振荡和一般振动力学数学模型的相似性, 利用随机子空间算法辨识低频振荡的频率、阻尼和振型。随机子空间算法无须人工激励电力系统, 利用日常负荷的随机波动激励系统, 通过相量测量单元 (PMU) 采集发电机功角摇摆轨迹数据, 识别电力系统振荡特征参数。在 Matlab 仿真平台上, 通过对一个 3 机电力系统的实例分析, 证明所提方法对振荡频率、阻尼比和振型识别的有效性。

关键词: 工况模态分析; 随机子空间法; 低频振荡; 电力系统

Tentative application of operational modal analysis in identifying power systems low frequency oscillations

CHEN Zhuo

(College of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China)

Abstract: Operational modal analysis is an advanced technology in the field of dynamic structure mechanics, which is proposed to identify low frequency oscillation characteristics in the power systems. In this paper, stochastic subspace method is used to identify frequency, damping ratio, and mode shape of power system oscillations based on the author's argument that there is an identical mathematic modal between general vibration mechanics and power system oscillation. During normal random load excitation instead of artificial exciting power system, the proposed algorithm can abstract oscillation parameters with generator angle swing information obtained from PMU. A simulation of 3-machine power systems based on MATLAB shows the validity of the proposed method.

Key words: operational modal analysis; stochastic subspace method; low frequency oscillation; power system

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)08-0034-04

0 引言

“工况模态分析”(Operational Modal Analysis)的概念来自于近年来结构动力学技术领域的最新进展,它是用来监测现代大型结构工程(如:高耸建筑、海洋平台、桥梁和飞行器等)振动模态的一种新思路^[1,2]。工况模态分析的概念与传统模态分析的概念区别在于前者不需要人工施加激励信号,而是利用正常工况下自身环境的激励作用进行模态辨识。比如:海洋平台正常工作时总是经受着海浪的冲击作用;再如:桥梁日常状态下总是经受过往车辆的激励。因此,对这些结构工程的动力学特性监测或模态辨识可以省去人工激励作用

(以往的人工激励是用大功率冲击碰撞击辨识对象),不仅避免了对结构工程的伤害,而且辨识过程可以不中断其正常工作,意义非常深远。

那么,工况模态分析对电力系统有什么启示呢?首先,电力系统低频振荡辨识问题和结构工程的模态分析问题在数学本质上可以统一起来(1节详述),因此结构力学的技术进展为动态电力系统分析可能提供新的思路;其次,电力系统振荡辨识同样需要在日常运行工况下进行,而不希望人为扰动电力系统。基于以上两点,作者认为,工况模态分析的概念应当引起电力同行的密切关注。本文尝试按照工况模态分析的基本框架,探讨电力系统日常工况下的低频振荡在线辨识问题。

1 电力系统低频振荡与振动力学数学模型的对比

振动是物理学,技术科学中广泛存在的物理现

基金项目: 贵州大学青年科学基金项目(2007-017),贵州省科学技术基金项目(2006-2114)

象,它更是结构动力学领域的一个长期倍受关注的问题。在振动系统中,质点 M 的振动规律 $x(t)$ 决定于作用在系统上各种力的性质,对于单自由度振动系统,有下列方程所决定^[3]:

$$m\ddot{x} + f_1(\dot{x}) + f_2(x) = f(t) \quad (1)$$

其中: m 为质量, x 为 M 的振动位移, $f_1(\dot{x})$ 为阻尼力, $f_2(x)$ 为弹性恢复力, $f(t)$ 为干扰力。

为了类比,考察单机对无穷大系统的转子摇摆方程:

$$\frac{T_j}{\omega_N} \ddot{\delta} + D\dot{\delta} + \frac{EV}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta = P_T \quad (2)$$

其中: T_j 为转子惯性时间常数, ω_N 为额定角速度, D 为阻尼系数, δ 为功角, E 为发电机电势, v 为无穷大母线电压, $X'_{d\Sigma}$ 为转移电抗, P_T 为原动机功率。

尽管式 (1) 和式 (2) 描述的是完全不同物理系统,但比较式 (1) 和式 (2),可以看出二者具有完全相同数学形态;对于多自由度振动系统,数学模型为 N 个相互耦合的二阶微分方程组成,其形式类似于多机电力系统摇摆方程。故电力系统低频振荡可以抽象为一般力学系统的振动问题。因此,有理由设想电力系统低频振荡辨识可以借鉴振动力学领域中试验模态分析的研究成果。

2 工况模态分析的实现——随机子空间方法

2.1 随机子空间方法的基本思想

工况模态分析是一个概念性的框架,它的具体实现方法正在研究当中,其中随机子空间法被认为是最具生命力的方法^[4]。基本原理如下:设待辨识的 N 阶线性系统可用离散状态空间模型表示为:

$$\begin{aligned} x_{k+1} &= Ax_k + Bu_k \\ y_k &= Cx_k + v_k \end{aligned} \quad (3)$$

式中: v_k 是和输入 u_k 无关的白噪声。设输入、输出数据序列为 u_k 和 y_k 被同步采集,并按 Hankel 矩阵格式存储到 U 和 Y 中。

根据式 (3) 确定的递推规律,可推出下式:

$$Y = \Gamma_s X + H_s U$$

其中: $X = [X(0), X(1), \dots, X(N-s+1)]$

$$\Gamma_s = [C, CA, L, CA^{s-1}]^T$$

H_s 是 Markov 参数的 Toeplitz 矩阵。使用 MOESP 方法,对如下定义的矩阵进行 RQ 分解:

$$\begin{bmatrix} U \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_u & 0 \\ R_{yu} & R_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_u \\ Q_y \end{bmatrix} \quad \text{然后对 } R_y \text{ 进行 SVD 分解:}$$

$R_y = U_n S_n V_n^T$, 其中 n 个主要左奇异向量就构成了 Γ_s 张成空间的一致估计。之后,由 Γ_s 可以得到系统矩阵 $\{A, B, C\}$ 的估计值。

如果进一步将激励信号 u_k 假设为白噪声序列,则可以不必采集 u_k , 仅采集系统输出 y_k 即可得到系统矩阵 $\{A, C\}$ 的估计值(不能得到 B)。这就是随机子空间法的思路。

2.2 模态辨识原理

电力系统低频振荡模态分析的传统方法是解析模态分析^[5]。它是根据电力系统非线性动力学模型,在平衡点处线性化以后求取 (A, C) , 而后利用特征分析法得到特征值和特征向量,也就得到了系统的振荡频率、阻尼和模态振型。

本文提出的方法,需要广域测量系统(WAMS)的技术支持,是一种试验模态分析方法,也是 WAMS 数据信息深度挖掘的前沿研究方向^[6-10]。由 2.1 节所述的随机子空间法辨识得到 $\{A, C\}$ 的估计值,解矩阵 A 的特征值,可得到特征值 z_r 和相应的特征向量 ϕ^r , 即

$$\Phi^{-1} A \Phi = Z \quad (4)$$

式中: $Z = \text{diag}[z_1, z_2, \dots, z_N]$, $\Phi = [\phi^1, \phi^2, \dots, \phi^N]$,

考虑到拉氏变换与 z 变换的关系

$$s_r = \frac{1}{\Delta t} \ln(z_r)$$

可求得下列模态参数:

$$\text{振荡频率: } \Omega_r = \sqrt{(\text{Re } s_r)^2 + (\text{Im } s_r)^2} \quad (5)$$

$$\text{阻尼比: } \zeta_r = \frac{-\text{Re } s_r}{\Omega_r} \quad (6)$$

$$\text{模态振型矩阵: } M = C \Phi \quad (7)$$

综上所述,只要 PMU 能够同步采集各发电机的功角摇摆轨迹,就可以估算出电力系统线性化模型 $\{A, C\}$, 进一步利用式 (5)、式 (6) 和式 (7) 可以辨识全部振荡参数。

3 算例研究

3.1 算例系统的结构及其参数

算例系统是一个 3 机 6 节点电力系统,接线图及潮流分布如图 1。(电压: kV, 功率: MVA)。

发电机标幺参数如下(容量基值 900 MVA, 电压基值 20 kV): $x_d = 1.8$, $x_q = 1.7$, $x'_d = 0.3$,

$x'_q = 0.55$, $x'_d = 0.25$, $x'_q = 0.25$ $T'_{d0} = 8.0$ s ,
 $T'_{q0} = 0.4$ s , $T'_{d0} = 0.03$ s , $T'_{q0} = 0.05$ s 转子惯性
 时间常数: $H = 12.1$ s(对应 G1); $H = 16.0$ s(对应 G2);
 $H = 12.5$ s(对应 G2)

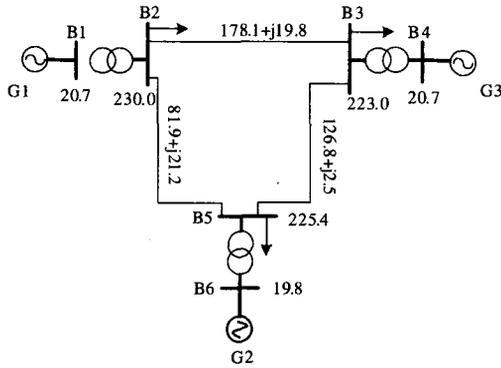


图 1 3 机系统接线及潮流分布

Fig.1 A 3-machine power system and its load flow

变压器标么参数 (容量基值 100 MVA, 电压基值 230 kV) 如下: 电抗 $X_T = 0.017$, 变比 $K_T = 1.0$ 。

线路标么参数 (容量基值 100 MVA, 电压基值 230 kV) 如下: $r = 0.0001$ pu/km, $x_L = 0.001$ pu/km, $b_c = 0.00175$ pu/km。联络线 (B2—B3): 100 km; 联络线 (B3—B5): 100 km; 联络线 (B2—B5): 60 km;

3.2 仿真试验设计

为了验证随机子空间方法用于电力系统振荡辨识的可行性, 利用 Matlab/Simulink 中的 Power System Blockset 建立一个 3 机测试系统 (图 1)。在辨识试验之前, 先通过基于已知数学模型的理论分析可知, 该系统共有 2 个机电振荡模式。一个模式表现为 G1 对 G3 的摇摆; 另一个是 G2 对 G3 的摇摆。下面是用试验 (辨识) 的方法获取振荡模式, 并与理论分析结果对比。

试验过程是: 设负荷节点 B2, B3, B5 在正常运行工况下, 负荷功率发生随机波动, 波动规律符合白噪声特点, 负荷变化情况如图 2 所示。

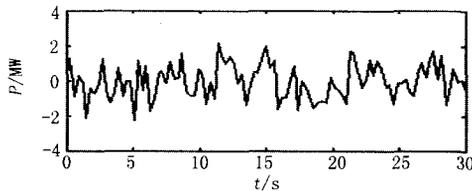


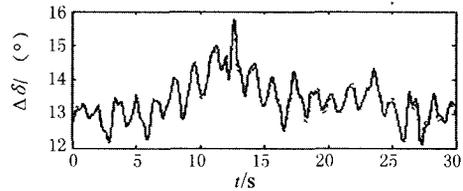
图 2 有功负荷随机波动

Fig.2 Stochastic data of active power load

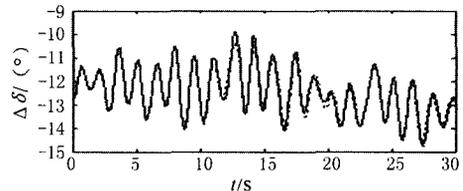
负荷的随机波动引起发电机功角的小幅摇摆, 将功角摇摆数据记录下来, 用 2 节的算法进行分析, 得出系统矩阵 $\{A, C\}$ 的估计值。同时利用特征分析法得出系统的特征值和特征向量。

3.3 仿真试验结果分析

为了说明由辨识而得到的系统矩阵 $\{A, C\}$ 是否可靠, 一般采用交叉验证法进行确认。即考察辨识模型和实际模型在相同激励下是否能达到一致的动态响应。设图 1 系统的负荷母线上有图 2 所示的有功功率波动, 在这种负荷波动激励下, 发电机功角摇摆曲线如图 3。其中实线是实际系统的响应, 虚线是辨识模型的响应。从拟和曲线可以看出, 辨识模型与实际模型的时域特性是很接近的。



(a) G1 相对 G3 的功角响应



(b) G3 相对 G2 的功角响应

—— 实际 - - - - 拟和

图 3 辨识输出与实际模型输出的比较

Fig.3 Response comparison of two models

根据辨识模型 $\{A, C\}$, 利用式 (4) 可以得出系统特征值。由式 (5) 和式 (6) 得到系统的振荡频率和振荡阻尼。为了说明辨识正确性, 另采用传统线性化方法^[5], 通过理论计算得到算例系统实际振荡频率和阻尼。表 1 给出了二者的对比结果。

表 1 模态参数辨识结果分析

Tab.1 Analysis of mode identification result

模 式	理论值		辨识值	
	频率/Hz	阻尼/(%)	频率/Hz	阻尼/(%)
M1	0.873 9	5.16	0.862 1	5.39
M2	0.786 6	6.39	0.798 9	6.58

由表 1 看出, 系统振荡频率和阻尼的辨识结果和理论计算结果都是非常接近的。振荡模式 M1 (G1 逆反于 G3) 的频率辨识误差为 1.4%, 阻尼误差为 4.3%; 振荡模式 M2 (G2 逆反于 G3) 的频率辨识误差为 1.5%, 阻尼误差为 2.9%, 辨识精度是可以接受的。

在电力系统低频振荡分析时, 振型分析也是一个重要内容。通过振型分析, 可以划分相对摇摆的机群, 确定振荡界面和振荡在电网中的传播路径。根据式(7)可辨识出每一模式的振型, 为了验证辨识结果, 通过对算例系统线性化状态矩阵的特征向量分析, 得出理论振型。将辨识振型和理论振型归一化后在极坐标系下表示(图4)。可以看出辨识振型和理论振型也是基本一致的。

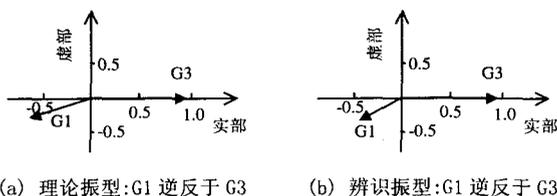


图4 G1对G3振荡模式的辨识振型

Fig.4 Identification shape of G1 vs G3 mode

因此, 在电力系统正常工况下, 无须人工激励, 使用随机子空间算法辨识电力系统的振荡特性是可行的。

4 结语

虽然国内外已先后建成若干WAMS, 形成了具有统一时标的数据库平台。但至今WAMS尚未在电网动态分析和控制中充分发挥作用。深入挖掘PMU/WAMS平台数据信息非常必要。本文尝试将结构动力学领域的工况模态分析概念应用于电力系统, 随机子空间算法可以在WAMS数据库平台上在线提取电力系统振荡特性。根据正常运行工况时电网负荷随机扰动下的功角响应数据, 提取系统机电模式特征值, 振荡频率和阻尼比的精度比较满意。工况模态分析在电力系统小干扰稳定性在线分析领域将有较好的应用前景。

最后说明, 实际电力系统日常负荷的随机变化可能混杂有色噪声和非平稳分量, 这将影响基于白噪声负荷假设的随机子空间算法的辨识精度。因此, 在信号平稳化和去噪方面仍有较多课题需要进一步研究。

参考文献

- [1] Hermans L, Auweraer H. Modal Testing and Analysis of Structures Under Operational Conditions[J]. Industrial Applications, Mechanics Systems and Signal Processing, 1999,13(2): 193-216.
- [2] 胡震涛. 船舶结构动载试验的基于参考测点随机子空间法[J]. 船舶工程, 2007, 29(6): 74-78.

HU Zhen-tao. Method of Reference Based on Stochastic Subspace Identification is Discussed by Dynamic Load Testing of Ship Structure[J]. Ship Engineering, 2007, 29(6): 74-78.

- [3] 俞云书. 结构模态试验分析[M]. 北京: 宇航出版社, 2000.
 - [4] 常军, 张启伟, 孙利民. 随机子空间方法在桥塔模态参数识别中的应用[J]. 地震工程与工程振动, 2006, 26(5): 183-188.
- CHANG Jun, ZHANG Qi-wei, SUN Li-min. Application of Stochastic Subspace Identification in Modal Parameter Identification of Bridge Tower[J]. Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 2006, 26(5): 183-188.
- [5] Kundur P. Power System Stability and Control[M]. New York: McGraw-Hill, 1994.
 - [6] 薛禹胜, 徐伟. 关于广域测量系统及广域控制保护系统的评述[J]. 电力系统自动化, 2007,31(15):1-5.
- XUE Yu-sheng, XU Wei. A Review of Wide Area Measurement System and Wide Area Control System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(15):1-5.
- [7] 鞠平, 谢欢, 孟远景. 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(21):56-60.
- JU Ping, XIE Huan, MENG Yuan-jing. Online Identification of Low-frequency Oscillations Based on Wide-area Measurements[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(21):56-60.
- [8] 郝正航, 李少波. 白噪声激励下的低频振荡模态参数辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2007,31(15):26-30.
- HAO Zheng-hang, LI Shao-bo. A White Noise Excitation Based Identification Method for Low-frequency Oscillation Modal Parameters[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007,31(15):26-30.
- [9] ZHOU Ning. Initial Results in Power System Identification From Injected Probing Signals Using a Subspace Method[J]. IEEE Trans on Power Syst, 2006, 21(3): 1296-1302.
 - [10] 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 Syst, 2003, 18(2): 167-173.

收稿日期: 2008-06-08; 修回日期: 2008-07-05

作者简介:

陈卓(1980-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为电子信息技术在电力系统的应用。E-mail: ee.chenz@gzu.edu.cn