

环境激励下电力系统外在表征及振荡识别方法研究

方连航, 刘红岩, 梁钰, 林道鸿, 吴强

(海南电网有限责任公司电力科学研究院(海南省理化分析重点实验室), 海南 海口 570311)

摘要:环境激励作用下的电力系统机电响应数据中蕴含着丰富的机电动态信息。文中推导了小幅环境激励下电力系统机电响应的解析形式,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,揭示了利用小幅环境激励作用下的系统响应提取系统振荡特征的基本原理,进而提出了基于动态模式分解算法(DMD)与随机响应数据的机电振荡特征参数辨识方法。以小幅负荷随机激励下 IEEE 4机2区域系统响应数据及某区域电网扰动录波数据为例,辨识所得参数与理论振荡特征参数的比较以及对概率统计结果的分析表明,DMD在随机激励下机电振荡参数识别中具有较强的适应性,验证了利用小幅环境激励下的随机响应识别系统机电振荡特征的正确性。

关键词:环境激励;机电振荡;随机响应;模态参数;动态模式分解

中图分类号:TM211

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)05-0114-07

0 引言

现代电网规模不断扩大,低频振荡已成为大规模互联电网普遍存在的问题^[1-3]。低频振荡的发生严重影响电力系统的安全稳定运行,一直受到国内外专家学者的关注^[4-5]。随着以同步相量测量装置(phasing measurement unit, 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^[6-9]。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,以环境激励下随机机电响应为基础的低频振荡特征参数提取与分析方法受到了学术界和工程界的广泛关注,文献[10-13]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相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,而忽略了对环境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研究和分析。

环境激励是自然界各物理系统中普遍存在的现象,为了计算和分析环境激励下系统机电响应过程,将随机变量引入传统微分方程,建立了随机微分方程^[14]。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^[15]。

文中从数学角度对小幅环境激励下的功率表征进行了阐释,从而揭示了电力系统机电动态过程中自然振荡与小幅环境激励下随机响应之间的内在联系。在分析小幅环境激励下系统响应特征的基础上,提出了基于动态模式分解算法(dynamic mode decomposition, DMD)与随机响应数据的机电振荡特征参数辨识方法。DMD 是一种数据驱动的模态分析手段^[16-17],可以准确捕捉电力系统机电振荡模态信息。IEEE 4机2区域系统及某实际系统量测数据验证了文中理论及机电振荡参数提取方法分析的正确性和可行性。

1 小幅环境激励下系统动态响应特征

发电机采用经典二阶模型时,单机无穷大系统线性化转子运动方程可表示为^[5]:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\delta}{dt} = \omega_0\Delta\omega \\ T_J \frac{d\Delta\omega}{dt} = \Delta P_T - \Delta P_e - D\Delta\omega \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Delta\delta$ 为同步发电机组转子角偏移; $\Delta\omega$ 为同步发电机组角频率偏差; ω_0 为角频率基准值; T_J 为同步发电机组惯性时间常数; ΔP_T 为发电机输入机械功率变化量; ΔP_e 为发电机电功率变化量; D 为综合阻尼系数。

将式(1)整理为二阶常系数微分方程:

$$\frac{T_J}{\omega_0} \Delta\ddot{\delta} + D\Delta\dot{\delta} + K_s\Delta\delta = \Delta P_T \quad (2)$$

式中: $K_s = (dP_e/d\delta)_{\delta=\delta_0}$, 为发电机组的同步功率系数, P_e 为发电机的电磁功率。令 $D\omega_0/T_J = 2\xi\omega_n$,

收稿日期:2019-03-17;修回日期:2019-04-29

基金项目:中国南方电网有限责任公司科技项目(073000K-K52180003)

因 $K_s \omega_0 / T_J = \omega_n^2$, 式(2)可以表示为如下形式:

$$\Delta \ddot{\delta} + 2\xi \omega_n \Delta \dot{\delta} + \omega_n^2 \Delta \delta = \Delta P_T \quad (3)$$

式中: ω_n 为系统固有机电振荡频率; ξ 为相应的衰减阻尼比。

在以负荷小幅随机波动为代表的环境激励下, 系统中的有功不平衡量处于随机波动状态。实际系统中有功负荷随机量近似服从高斯分布^[15], 假设其为 h , 则有功负荷随机波动条件下, 发电机机械功率也会产生相应的波动, 令 $\Delta P_T = \eta$, 代入式(3)可得:

$$\Delta \ddot{\delta} + 2\xi \omega_n \Delta \dot{\delta} + \omega_n^2 \Delta \delta = \eta \quad (4)$$

求解式(4)即可得到系统状态变量的时域解析解。式(4)的解由通解和特解组成^[18], 其通解为方程 $\Delta \ddot{\delta} + 2\xi \omega_n \Delta \dot{\delta} + \omega_n^2 \Delta \delta = 0$ 的解, 即:

$$Y(t) = A_0 e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi_0) \quad (5)$$

式中: ω_d 为计及阻尼时的固有振荡频率, $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$; $A_0 = \sqrt{B_1^2 - B_2^2}$; $\varphi_0 = \arctan(B_2/B_1)$, B_1 和 B_2 为由系统初始条件决定的积分常数, 表达式分别为:

$$B_1 = x_0 - \frac{1}{(\xi \omega_n)^2 + \omega_d^2} \eta_0 \quad (6)$$

$$B_2 = \frac{\dot{x}_0 + \xi \omega_n \left[x_0 - \frac{\eta_0}{(\xi \omega_n)^2 + \omega_d^2} \right] - \frac{1}{(\xi \omega_n)^2 + \omega_d^2} \dot{\eta}_0}{\omega_d} \quad (7)$$

式(4)的特解为随机量 h 作用下线性系统 $H(t)$ 的时域解, 即:

$$y^*(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} H(\tau) \eta(t - \tau) d\tau \quad (8)$$

由随机过程理论可知, 当高斯随机变量作用于线性系统时, 其时域响应仍为服从高斯分布的随机变量^[19], 令 $\eta^* = y^*(t)$, 则 η^* 仍然服从高斯分布。因此, 小幅环境激励下, 系统状态变量的时域解析解的表达式为:

$$\Delta \delta_1(t) = Y(t) + y^*(t) = A_0 e^{-\xi \omega_n t} \sin(\omega_d t + \varphi_0) + \eta^* \quad (9)$$

式(9)中, 负荷小幅随机波动下系统响应由振荡分量和随机分量两部分构成。一般情况负荷随机波动相对较小, 同时在系统中快速励磁、电力系统稳定器(power system stabilizer, PSS)及调速器等控制器的共同作用, 机电时间尺度下系统状态变量振荡分量幅值也非常小, 常常被淹没在噪声中, 利用PMU等装置测量得到的有功功率、电压、频率等随机响应的外在表征为无序的类噪声信号。通过

对式(9)的分析可以发现, 随机响应是环境激励下系统动态响应与量测噪声叠加后的类噪声信号, 其中有能够反映系统动态特征的信息。利用随机响应提取系统动态特征, 能够避免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, 发现潜在安全威胁, 为保证电网安全稳定运行提供依据。

2 DMD

DMD是在Koopman谱基础上提出的一种数据驱动的模式分析手段, 可以准确地从随机数据中捕捉动态系统振荡模态信息, 相比于目前应用的较为广泛的随机子空间算法和频域分解法, DMD算法计算速度更快。

实际物理系统的状态变量为连续变量, 而连续状态变量的量测量为离散量, 设采样间隔为 Δt , 则第 k 个采样点的状态变量 $\Delta x_k = \Delta x(k\Delta t)$, 采样区间内各采样点的状态变量共同构成数据集。文中利用下式来描述采样数据序列^[16-17]:

$$\mathbf{X}_m = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta x_1 & \Delta x_2 & \cdots & \Delta x_m \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{X}_{m+1} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \Delta x_2 & \Delta x_3 & \cdots & \Delta x_{m+1} \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}$$

则系统状态方程离散化形式为:

$$\mathbf{X}_{m+1} = \mathbf{A}_d \mathbf{X}_m \quad (11)$$

式中: \mathbf{A}_d 为离散系统状态矩阵。且实际系统量测数据集的数据量较大, \mathbf{A}_d 为一个高维矩阵, 希望得到一个低维系统近似矩阵, 用该矩阵的特征值来近似估算 \mathbf{A}_d 的特征值, 即可以在 \mathbf{A}_d 未知的前提下, 分析低维系统近似矩阵即可研究原系统的动态特征。

对于秩为 r 的原始数据矩阵 \mathbf{X}_m , \mathbf{A}_d 与系统低维近似矩阵 \mathbf{A} , 可通过 \mathbf{X}_m 的本征正交分解(proper orthogonal decomposition, POD)模态 \mathbf{U} 关联起来, 即:

$$\mathbf{A}_d \approx \mathbf{U} \tilde{\mathbf{A}} \mathbf{U}^* \quad (12)$$

式中: \mathbf{U} 可由原始数据矩阵 \mathbf{X}_m 的奇异值分解(singular value decomposition, SVD)得到, 即:

$$\mathbf{X}_m \approx \mathbf{U} \Sigma \mathbf{V}^* \quad (13)$$

式中: \mathbf{U} 和 \mathbf{V} 均为酉矩阵, 且满足 $\mathbf{U}^* \mathbf{U} = \mathbf{I}$, $\mathbf{V}^* \mathbf{V} = \mathbf{I}$; \mathbf{I} 为单位矩阵; Σ 是一个奇异值对角矩阵。

$\tilde{\mathbf{A}}$ 的计算可视为式(14)的最小化问题, 即:

$$\underset{\tilde{\mathbf{A}}}{\text{minimize}} = \left\| \mathbf{X}_{m+1} - \mathbf{U} \tilde{\mathbf{A}} \Sigma \mathbf{V}^* \right\|_F^2 \quad (14)$$

式中: $\|\cdot\|_F$ 为 Frobenius 范数。

结合式(12)一式(14),可得:

$$A_d \approx \tilde{A} = U^* X_{m+1} V^* \Sigma^{-1} \quad (15)$$

对 \tilde{A} 进行特征值分解,如式(16)所示:

$$\tilde{A} = W \Lambda W^{-1} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ w_1 & w_2 & \cdots & w_r \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \cdots & \lambda_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ w_1 & w_2 & \cdots & w_r \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \end{bmatrix}^{-1} \quad (16)$$

式中: w_i 为低维系统近似矩阵 \tilde{A} 的特征向量, λ_i 为其特征值。并且特征向量矩阵 W 的第 i 列特征向量 w_i 表示 DMD 算法的第 i 个模态,相应的可表示为:

$$\varphi_i = U w_i \quad (17)$$

φ_i 为实际系统每个模式对应的模态向量。对应连续系统的特征值为:

$$\eta_i = \ln(\lambda_i) / \Delta t = a_i \pm b_i \quad (18)$$

进而求得系统第 i 个振荡模式的振荡频率及阻尼比:

$$\begin{cases} f_i = b_i / (2\pi) \\ \zeta_i = -a_i / \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \end{cases} \quad (19)$$

以小幅环境激励下协调随机响应数据为基础,利用 DMD 算法提取系统机电振荡特征参数,流程如图 1 所示。

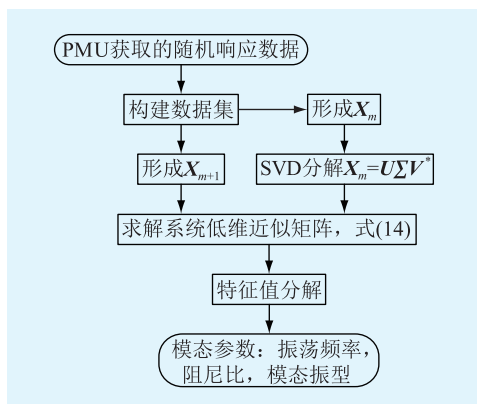


图 1 基于 DMD 的特征参数提取流程
Fig.1 Flow chart of characteristic parameter extraction based on DMD

3 仿真计算与分析

3.1 IEEE 4 机 2 区域测试系统

以 IEEE 4 机 2 区域系统为测试系统进行计算和分析,系统结构如图 2 所示,详细数据参见文献[5]。首先,利用基于特征值的小干扰稳定性分析算法 (small signal analysis stability, SSAT) 提取基础

运行方式下系统机电振荡参数,共计算得到 1 个区间振荡模式,2 个本地振荡模式,结果如表 1 所示。与 3 个机电模式对应的模态振型如图 3 所示。

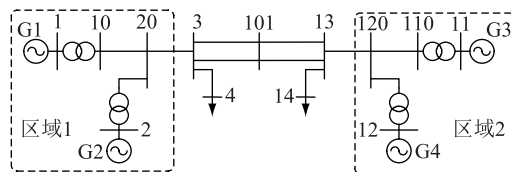


图 2 IEEE 4 机 2 区域系统结构
Fig.2 Diagram of IEEE 4 generator 2 area system

表 1 4 机 2 区域系统特征值分析结果
Table 1 The eigenvalue results of 4 generator 2 area system

| 模式 | 频率/Hz | 阻尼比/% | 模态 |
|-----|---------|-------|------------------------------|
| I | 0.552 2 | 1.66 | 机群 1 (G1&G2) vs 机群 2 (G3&G4) |
| II | 1.175 6 | 11.75 | G1vsG2 |
| III | 1.184 7 | 10.68 | G3vsG4 |

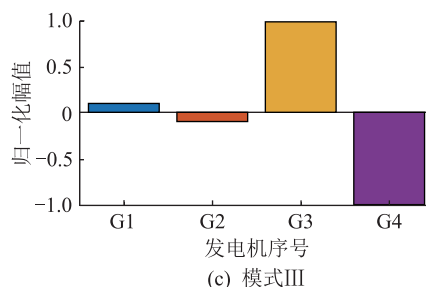
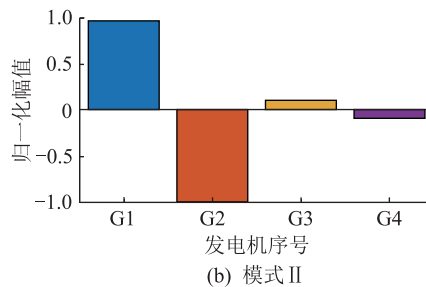
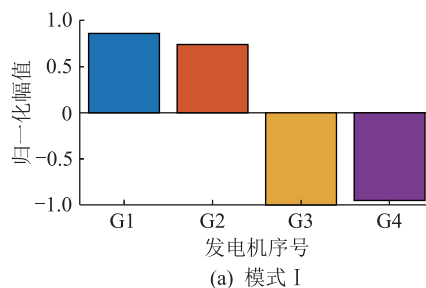


图 3 4 机 2 区域系统理论模态图
Fig.3 Modal shape of 4 generator 2 area system

假设负荷节点 (节点 4 及节点 14) 处的负荷为基础值的 5% 随机波动,利用电力系统数值仿真软件计算系统随机响应并分析其概率分布,如图 4 和图 5 所示。400 s 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。

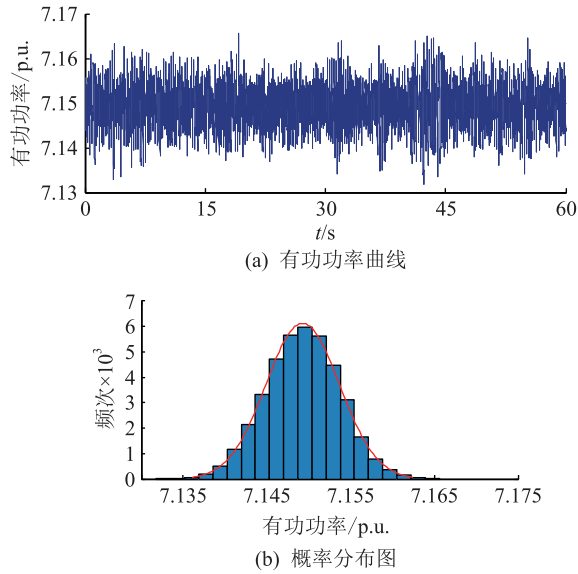


图 4 发电机 1 出口有功功率时域响应及其概率分布

Fig.4 The time domain response and probability distributions of active power of generator 1

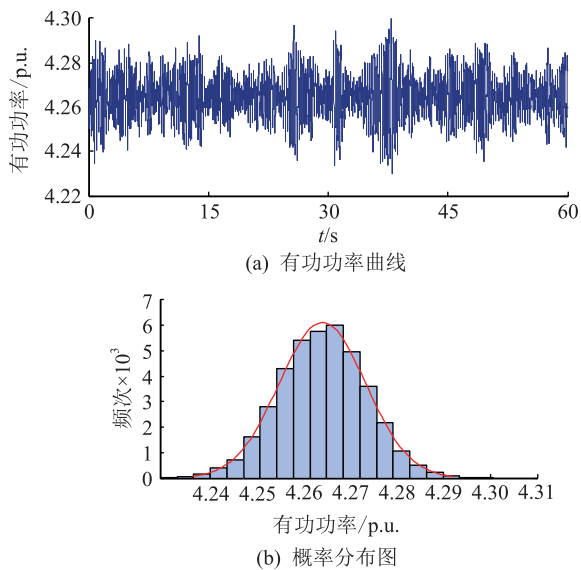


图 5 联络线有功功率时域响应及其概率分布

Fig.5 The time domain response and probability distribution of active power of tie-line

表 2 发电机有功输出及联络线有功统计结果

Table 2 The statistical results of active power and tie-line active power generator output

| 名称 | 标准差 | 均值/MW | 基础潮流/MW |
|-----|---------|---------|---------|
| G1 | 0.004 4 | 7.149 3 | 7.261 1 |
| G2 | 0.005 1 | 6.888 2 | 7.000 0 |
| G3 | 0.006 8 | 6.985 7 | 7.000 0 |
| G4 | 0.007 3 | 6.898 9 | 7.000 0 |
| 联络线 | 0.012 4 | 4.192 9 | 4.161 0 |

表 2 中,4 台发电机统计均值与基础运行方式值十分接近,近似相等;联络线有功传输功率与其

统计均值同样较为接近。可知,在波动幅值较小的环境激励下,系统运行点基本保持不变,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。

以各台发电机有功功率的随机响应数据为基础,利用 DMD 算法辨识系统模态参数。以时长为 1 min 的窗口数据作为 DMD 算法输入,间隔 10 s 滑动一次计算数据窗口,60 min 的随机响应数据计算结果如表 3 和表 4 所示。同时,采用随机子空间辨识算法(stochastic subspace identification, SSI)^[20-21]对上述数据进行计算和分析。3 种机电振荡模式的频率及阻尼比的统计均值与基础运行方式的 SSAT 结果及 SSI 计算结果十分接近,且方差较小。

表 3 4 机 2 区域系统辨识结果(频率)

Table 3 Identification results of 4 generator 2 area system (frequency) Hz

| 模式 | SSAT | DMD | | SSI | |
|-----|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 |
| I | 0.552 2 | 0.580 8 | 0.021 4 | 0.597 3 | 0.031 4 |
| II | 1.175 6 | 1.175 2 | 0.085 2 | 1.182 5 | 0.095 7 |
| III | 1.184 7 | 1.217 5 | 0.055 5 | 1.236 2 | 0.065 7 |

表 4 4 机 2 区域系统辨识结果(阻尼比)

Table 3 Identification results of 4 generator 2 area system (damping ratio) %

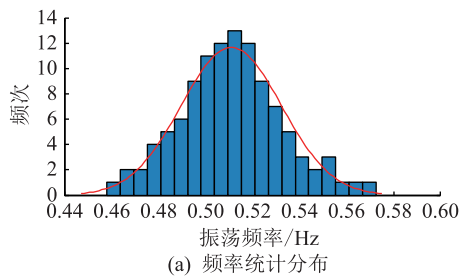
| 模式 | SSAT | DMD | | SSI | |
|-----|-------|-------|------|-------|------|
| | | 均值 | 标准差 | 均值 | 标准差 |
| I | 1.66 | 1.64 | 0.91 | 1.92 | 1.12 |
| II | 11.75 | 11.37 | 2.85 | 12.77 | 3.58 |
| III | 10.68 | 10.55 | 3.57 | 11.72 | 3.99 |

同时,由图 6、图 7 和图 8 可知,DMD 算法辨识得到的模态参数(振荡频率和阻尼比)在基础运行下模态参数附近出现频次较高,随着辨识得到的模态参数与基础运行方式下模态参数值之间差值的增大,辨识得到模态参数值出现频次呈逐渐减小的趋势,该结果表明随机相应数据中所蕴含的机电响应信息能够有效反映系统真实机电振荡特性,且采用文中提出的基于 DMD 的机电振荡特征参数提取算法的辨识效果良好。

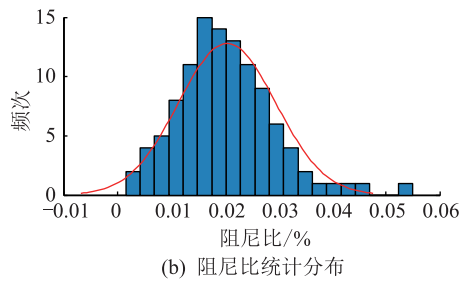
图 9 为基于 DMD 与随机响应数据辨识得到的振荡模态图,其反映的机组参与信息与图 3 所示的振荡模式相同,进一步验证了文中机理分析的可行性和正确性。

3.2 实际电网量测数据分析

以国内某电网扰动前后同步相量测量单元(phasing measurement unit, PMU)录波数据为例,分

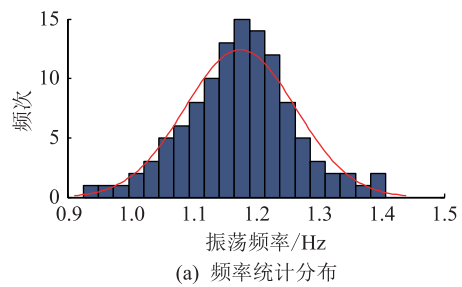


(a) 频率统计分布

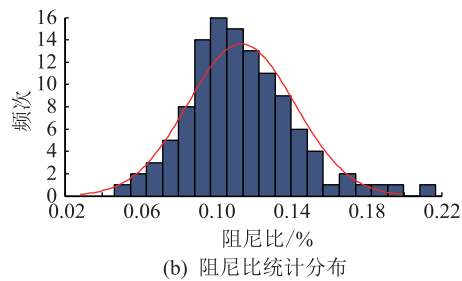


(b) 阻尼比统计分布

图6 区间振荡频率及阻尼比辨识结果的概率分布
Fig. 6 The probability distributions of identification results of interarea oscillation frequency and damping ratio

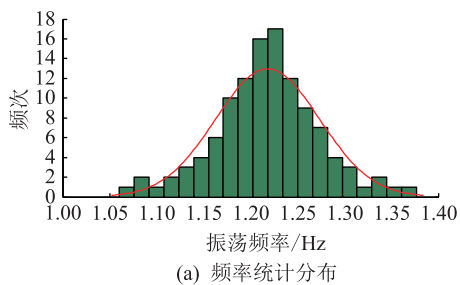


(a) 频率统计分布

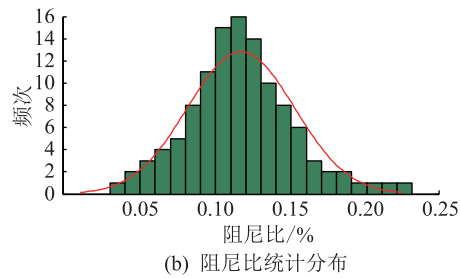


(b) 阻尼比统计分布

图8 局部振荡频率及阻尼比辨识结果的概率分布
Fig.8 The probability distributions of identification results of local oscillation frequency and damping ratio



(a) 频率统计分布

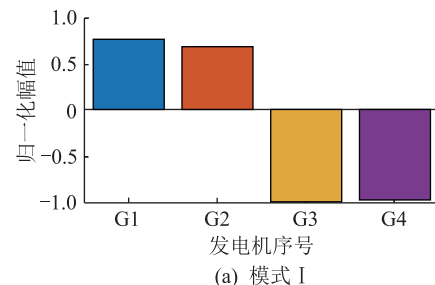


(b) 阻尼比统计分布

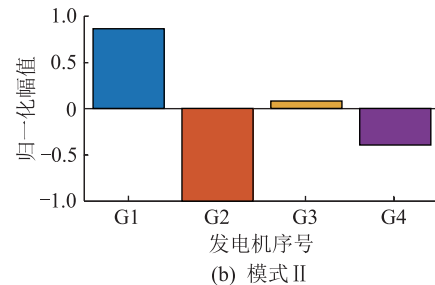
图7 局部振荡频率及阻尼比辨识结果的概率分布
Fig.7 The probability distributions of identification results of local oscillation frequency and damping ratio

析系统扰动前后的机电振荡特征。扰动前后 1 min 录波数据如图 10 所示。

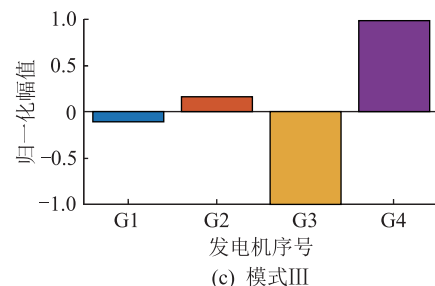
首先利用 DMD 算法对扰动前 1 min 中的随机响应数据进行计算,得到的 5 个机电振荡模式及参数如表 4 所示。该运行方式下,3 台发电机参与的机电振荡模式有 5 个,包括 1 个区间模式与 4 个本地模式。实际系统中安装 PMU2 和 PMU3 的发电机组位于同一区域,PMU1 所在发电机处于另一区域,且 2 个区域相距较远,并由 PMU1 所在区域向 PMU2 和 PMU3 所在区域送电,基于随机响应的计算结果与系统实际情况相吻合。



(a) 模式 I



(b) 模式 II



(c) 模式 III

图9 4机2区域系统模态辨识结果
Fig.9 Modal identification of 4 generator 2 area system

利用 Prony 拟合算法对故障后 5 s 的暂态数据进行计算和分析,所得 2 个振荡模式参数见表 5。该次事故为 PMU1 所在区域某高压母线发生瞬时三相接地短路,由 Prony 辨识结果可以看出故障激发

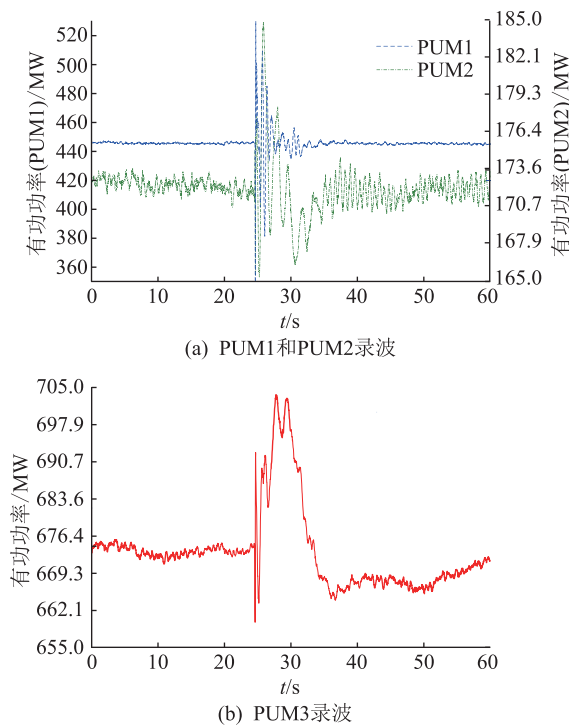


图 10 某实际电网 PMU 录波

Fig.10 PMU recording of an actual power grid

表 4 实际系统随机响应数据计算结果

Table 4 The results of actual system ambient data

| 模式 | 频率/Hz | 阻尼比/% | 模态 |
|-----|---------|-------|---------------------|
| I | 0.568 3 | 13.84 | PMU1 vs PMU2 & PMU3 |
| II | 0.953 1 | 11.46 | PMU2 vs PMU3 |
| III | 1.089 8 | 16.53 | PMU3 本地模式 |
| IV | 1.393 6 | 10.53 | PMU1 本地模式 |
| V | 1.612 8 | 20.41 | PMU2 本地模式 |

起的 2 个机电振荡模式分别为:(1) 3 个发电机均参与的区间模式;(2) PMU1 所在区域本地模式。

表 5 故障后 5 s 暂态数据 Prony 拟合结果

Table 5 Transient data Prony fitting results of 5 seconds after failure

| 模式 | 频率/Hz | 阻尼比/% | 模态 |
|----|---------|-------|---------------------|
| I | 0.515 3 | 13.84 | PMU1 vs PMU2 & PMU3 |
| II | 1.321 0 | 9.62 | PMU1 本地模式 |

对比表 4 及表 5 可知,故障激发出的振荡特征与利用随机响应数据提取的振荡特征基本吻合,利用随机响应数据及 DMD 算法能够得到系统潜在机电振荡模式,对于电力系统小干扰稳定在线量化评估具有重要的指导作用。

4 结论

文中在分析环境激励下系统随机响应特性的

基础上,提出了基于 DMD 算法的机电振荡模态参数识别方法,仿真计算与分析结果表明:

(1) 对于大规模电力系统,小幅环境激励(如负荷小幅波动)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 DMD 算法能够从随机相应数据中提取出系统机电振荡参数,同时所提取的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文中提出的基于随机响应数据与 DMD 算法的机电振荡特征识别方法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。

参考文献:

- [1] KUNDAR P, PASERBA J, AJJARAPU V, et al. Definition and classification of power system stability [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004(19): 1387-1401.
- [2] 孙吉波,伍双喜,刘俊磊,等.一起区域外机组引发的低频振荡对广东电网的影响[J].广东电力,2017,30(12):81-85. SUN Jibo, WU Shuangxi, LIU Junlei, et al. Influence of low-frequency oscillation caused by outside area unit on Guangdong power grid [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(12): 81-85.
- [3] 区允杰,陈刚.基于改进 ITD 法的低频振荡参数辨识研究[J].广东电力,2019,32(5):73-79. OU Yunjie, CHEN Gang. Study on identification of low-frequency oscillation parameters based on improved ITD method [J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(5): 73-79.
- [4] 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. YU Yixin, LI Peng. The impact of weak interconnection of bulk power grids to damping and dynamic stability of power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 6-11.
- [5] KUNDER P. Power system stability and control [M]. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1994.
- [6] SANCHEZ-GASCAJ J, TRUDNOWSKID. Identification of electromechanical modes in power systems [R]. IEEE Task Force Identifi. Electromec. Modes Power Syst. Stabil., Power Energy Society, 2012.
- [7] 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可控性评估方法[J].电力自动化设备,2014,34(2):54-60. YANG Deyou, CAI Guowei, CHEN Jiarong. Characteristics extraction and controllability evaluation based on dynamic response of electro-mechanical oscillation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 54-60.
- [8] 孙景涛.基于混合编程技术的电力系统低频振荡辨识软件设计[J].广东电力,2018,31(4):90-94. SUN Jingtao. Design on low-frequency oscillation identification software for power system based on hybrid programming [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(4): 90-94.

- [9] 刘亚南,王义,钟永洁,等. 基于约束EKF的低频振荡模态参数辨识[J]. 广东电力,2018,31(7):77-83.
LIU Yanan, WANG Yi, ZHONG Yongjie, et al. Identification for modal parameters of low frequency oscillation based on constrained EKF [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31 (7): 77-83.
- [10] PRAVEEN T, SRIVASTAVA S C, SINGH S N. A modified TLS-ESPRIT-based method for low-frequency mode identification in power systems utilizing synchrophasor measurements [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011 (26): 719-727.
- [11] NEZAM S S A, VAITHOANATHAN V. Electromechanical mode estimation using recursive adaptive stochastic subspace identification [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014 (29): 349-358.
- [12] LIU G, VENKATASUBRAMANIAN V M. Oscillation monitoring from ambient PMU measurements by frequency domain decomposition [J]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, 2008(27): 2821-2824.
- [13] ZHOU N, PIERRE J W, HAUER J F. Initial results in power system identification from injected probing signals using a subspace method [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2006 (21): 1296-1302.
- [14] BERNT K. Stochastic differential equations (6th Edition) [M]. New York: Springer Press, 2003.
- [15] FEDETICO M, RAFACEL Z. A systematic method to model power systems as stochastic differential algebraic equations [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013 (28): 4537-4544.
- [16] JONATHAN H T, CLARENCE W R, DIRK M L, et al. On dynamic mode decomposition: theory and applications [J]. Journal of Computational Dynamics, 2014, 1(2): 391-421.
- [17] MEZIC I. Analysis of fluid flows via spectral properties of the Koopman operator [J]. Annu. Rev. Fluid Mech., 2013, 45 (1): 357-378.
- [18] 宋燕. 二阶常系数非齐次线性微分方程的通解形式[J]. 高等数学研究, 2011, 14(3): 6-7.
SONG Yan. General solution of second order non-homogeneous LDE with constant coefficients [J]. Studies in College Mathematics, 2011, 14(3): 6-7.
- [19] 陆大金, 张颢. 随机过程及其应用(第2版) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
LU Dajin, ZHANG Hao. Stochastic processes and their application (second edition) [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.
- [20] 陈卓, 敖伟智, 郝正航. 电力系统振荡模式识别的特征系统实现方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(5): 40-44.
CHEN Zhuo, AO Weizhi, HAO Zhenghang. Power system oscillation modes identification based on eigensystem realization algorithm [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2008, 20(5): 40-44.
- [21] EDWIN R, GUIDO D R. Reference-based combined deterministic-stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2008(22): 617-637.

作者简介:



方连航

方连航(1987),男,硕士,工程师,从事电力系统仿真分析工作(E-mail:292281350@qq.com);

刘红岩(1990),女,硕士,工程师,从事电力系统分析工作;

梁钰(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统分析、继电保护工作。

Characteristics of electromechanical responses and identification undergoing slight ambient excitation

FANG Lianhang, LIU Hongyan, LIANG Yu, LIN Daohong, WU Qiang

(Electric Power Research Institute of Hainan Power Grid Corporation Ltd. (Hainan Provincial Key Laboratory of Physical and Chemical Analysis), Hainan 570311, China)

Abstract: There is a wealth of dynamic information hidden in system responses, which is subject to the random excitations. The analytical form of electromechanical response of power system under small environmental excitation are deduced, and the existence of electromechanical oscillation characteristics in the ambient response of power system is proved from the mathematical point of view. A method for oscillation parameters identification of power system on the basis of dynamic mode decomposition (DMD) algorithm is proposed. By comparing the results of the electromechanical oscillations parameters identification with theoretical characteristic parameters and analysis of the probability statistical results show that DMD algorithm has strong adaptability, meanwhile the correctness of oscillations parameters identification by using the ambient signals is verified by the simulation analysis of IEEE 4 generators 2 area system and a regional power grid disturbance recording data.

Keywords: ambient excitation; electromechanical oscillation; random response; modal parameters; dynamic mode decomposition

(编辑 方晶)