

基于动态响应的机电振荡特征识别与能控性评估方法

杨德友¹, 蔡国伟¹, 陈家荣²

(1. 东北电力大学 电气工程学院, 吉林 吉林 132012; 2. 香港理工大学 电机工程学系, 香港 999077)

摘要: 在对基于随机子空间辨识 (SSI) 算法的系统辨识理论进行深入研究的基础上, 设计了基于 SSI 的电力系统机电振荡特征识别方法, 并提出了基于响应的参与因子计算方法, 从而实现了系统能控性的量化评估。采用所提方法对系统内各发电机动态角频率响应进行计算, 能够从全局角度对系统机电振荡特征进行分析, 有效地避免了传统基于单一信号的低频振荡分析方法计算结果信息量少的缺点。IEEE 39 节点系统仿真结果表明所提方法具有较高的识别精度和计算效率。

关键词: 电力系统; 机电振荡; 能控性; 随机子空间; 参与因子; 动态响应; 稳定性

中图分类号: TM 712

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.02.010

0 引言

随着电力系统规模的不断扩大、大容量远距离输电走廊的建设以及大机组快速励磁的应用, 低频振荡已成为威胁大规模互联电网安全稳定运行的关键问题之一^[1-3]。

传统低频振荡分析方法主要是基于模型的小信号分析方法^[4], 但随着系统规模的增加、控制设备的大量投运及大规模新能源发电的并网, “维数灾”和模型准确性问题成为现阶段小信号分析法应用的主要障碍。广域相量测量系统 WAMS (Wide Area Measurement System) 的应用为基于量测的电力系统低频振荡分析提供了有力的技术支持^[5], 使得 Prony^[6-7]、小波变换^[8]、HHT^[9-10]等信号分析方法在低频振荡特征参数识别中得到了广泛的应用。基于信号的低频振荡分析方法不依赖于系统模型, 仅通过对系统动态量测信号 (发电机功角、发电机角频率和联络线有功等) 的计算即可实现机电振荡特征参数的提取。但是, 现有相关文献所提出和应用的信号分析工具只能对某一局部发电机功角、发电机有功功率及联络线有功等单一信号进行处理和分析, 无法从全局角度对扰动后的振荡现象进行深入分析。同时, 现有方法只能得到扰动后系统振荡频率及阻尼比等特征参数, 信息含量少, 对指导运行人员采取紧急控制措施抑制低频振荡, 保证电力系统安全稳定运行的作用十分有限。

文献 [11] 将随机子空间辨识 SSI (Stochastic Subspace Identification) 方法应用于电力系统低频振荡分析中。该方法能够在提取频率及阻尼比的同时,

实现振型的辨识, 丰富了基于动态响应的低频振荡辨识结果的信息。相比于传统单一信号分析方法, SSI 通过对系统内全部发电机动态响应的计算, 能够准确地获取系统降阶线性化状态方程, 进而从所得线性化状态方程中获取更多、更丰富的信息。

为进一步丰富 SSI 算法的辨识结果, 提高基于响应的低频振荡分析结果的实用性, 本文在 SSI 结果的基础上, 利用矩阵变换理论^[12], 推导出了基于响应的参与因子计算方法, 并利用参与因子实现了系统能控性的量化评估。数字仿真充分验证了本文方法在电力系统低频振荡分析中的可行性及优越性。

1 基于 SSI 的机电振荡特征识别

1.1 SSI 算法

在实际应用中, 量测数据在时间上都是离散的, 经离散采样后, 可得如下随机状态空间系统^[13]:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}_d \mathbf{x}_k + \mathbf{w}_k, \quad \mathbf{A}_d = \mathbf{e}^{\mathbf{A}\Delta t} \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C} \mathbf{x}_k + \mathbf{v}_k \end{aligned} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{x}_k \in \mathbf{R}^n$ 为系统状态量; $\mathbf{y}_k \in \mathbf{R}^l$ 为测量得到的输出量; $\mathbf{w}_k \in \mathbf{R}^n$ 和 $\mathbf{v}_k \in \mathbf{R}^l$ 均为假定白噪声, 且 $E(\mathbf{w}_k) = E(\mathbf{v}_k) = \mathbf{0}$; $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 和 $\mathbf{C} \in \mathbf{R}^{l \times n}$ 分别代表系统状态矩阵和输出矩阵; Δt 为采样间隔。

对式 (1) 所示的随机系统, 由采样时序数据组成 Hankel 矩阵:

$$\mathbf{H} = \mathbf{Y}_{0|2i-1} = \begin{bmatrix} \mathbf{y}_0 & \mathbf{y}_1 & \cdots & \mathbf{y}_{j-1} \\ \mathbf{y}_1 & \mathbf{y}_2 & \cdots & \mathbf{y}_j \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{y}_{i-1} & \mathbf{y}_i & \cdots & \mathbf{y}_{i+j-2} \\ \mathbf{y}_i & \mathbf{y}_{i+1} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j-1} \\ \mathbf{y}_{i+1} & \mathbf{y}_{i+2} & \cdots & \mathbf{y}_{i+j} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \mathbf{y}_{2i-1} & \mathbf{y}_{2i} & \cdots & \mathbf{y}_{2i+j-2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{0|i-1} \\ \mathbf{Y}_{i|2i-1} \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{Y}_p}{\mathbf{Y}_f} \quad (2)$$

$$\mathbf{Y}_p^* = \mathbf{Y}_{0|i}, \quad \mathbf{Y}_f = \mathbf{Y}_{i+1|2i-1}$$

其中, $i=2n$, n 为系统阶数; j 为量测量采样数。

令正交投影所得矩阵为:

收稿日期: 2013-01-27; 修回日期: 2013-12-03

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51177010, 51377017); 长江学者和创新团队发展计划 (IRT1114)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51177010, 51377017) and Changjiang Scholars & Innovative Research Team in University (IRT1114)

$$\mathbf{O}_i = \mathbf{Y}_f / \mathbf{Y}_p \quad (3)$$

$$\mathbf{O}_{i-1} = \mathbf{Y}_f^+ / \mathbf{Y}_p^+ \quad (4)$$

计算 $\mathbf{O}_i$ 奇异值分解(SVD)值:

$$\mathbf{W}_1 \mathbf{O}_i \mathbf{W}_2 = \mathbf{U} \mathbf{S} \mathbf{V}^T = \begin{bmatrix} \mathbf{U}_1 & \mathbf{U}_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{S}_1 & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1^T \\ \mathbf{V}_2^T \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中,系数矩阵 $\mathbf{W}_1 = [(1/j)\mathbf{Y}_f \mathbf{Y}_f^T]^{-1/2}$, $\mathbf{W}_2$ 为 $j \times j$ 维单位阵。

则延伸可观察矩阵 $\mathbf{F}_i$ 和 $\mathbf{F}_{i-1}$ 可表示为:

$$\mathbf{F}_i = \mathbf{W}_1^{-1} \mathbf{U}_1 \mathbf{S}_1^{1/2} \quad (6)$$

$$\mathbf{F}_{i-1} = \mathbf{F}_i \quad (7)$$

利用式(3)、(4)、(6)和(7)可得 Kalman 滤波状态序列:

$$\hat{\mathbf{X}}_i = \mathbf{F}_i^\dagger \mathbf{O}_i \quad (8)$$

$$\hat{\mathbf{X}}_{i+1} = \mathbf{F}_{i+1}^\dagger \mathbf{O}_{i+1} \quad (9)$$

其中, $\dagger$ 表示相应矩阵的伪逆。

将式(2)、(8)和(9)代入式(10)即可计算得到状态矩阵及输出矩阵:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{A}_d \\ \mathbf{C} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_{i+1} \\ \mathbf{Y}_{li} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{X}}_i^\dagger \quad (10)$$

1.2 机电振荡特征参数识别

在确定离散系统状态矩阵 $\mathbf{A}_d$ 后对其进行特征值分解:

$$\mathbf{A}_d = \boldsymbol{\psi} \boldsymbol{\Lambda} \boldsymbol{\psi}^{-1} \quad (11)$$

其中, $\boldsymbol{\Lambda} = \text{diag}(\eta_i) \in \mathbf{R}^{n \times n}$, η_i 为离散系统特征值, $i = 1, 2, \dots, n$; $\boldsymbol{\psi}$ 为系统特征向量。

根据离散系统与连续系统的特征值关系可得连续时间系统特征值^[14]:

$$\lambda_i = a_i \pm j b_i = \ln \eta_i / \Delta t \quad (12)$$

进而可以得到振荡频率及阻尼比计算公式:

$$\begin{aligned} f_i &= \sqrt{a_i^2 + b_i^2} / (2\pi) \\ \xi_i &= -a_i / \sqrt{a_i^2 + b_i^2} \end{aligned} \quad (13)$$

系统的模态振型定义为输出点处的系统特征向量:

$$\boldsymbol{\varphi} = \mathbf{C} \boldsymbol{\psi} \quad (14)$$

2 机电振荡评估方法及流程

2.1 基于响应的参与因子

在传统小信号分析方法中,通常利用参与因子来表征特征根与状态变量间的相关性,参与因子的大小反映了相应状态变量在某个振荡模式中的能控性^[15],通常用来帮助选择控制地点,以实现功率振荡的快速抑制。

不同于传统小信号分析方法中的状态矩阵,利用 SSI 方法从系统动态响应中提取的状态矩阵中相应的状态量均为虚拟状态量,无法与实际系统状态

量一一对应。因此,直接利用 SSI 结果计算参与因子就变得十分困难。为解决上述问题,首先引入相似变换矩阵 $\mathbf{T} = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n)$,忽略式(1)中的噪声项,对于连续时间系统有^[12]:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{z}} &= \mathbf{H} \mathbf{z} \\ \mathbf{y} &= \bar{\mathbf{C}} \mathbf{x} \\ \mathbf{x} &= \mathbf{T} \mathbf{z} \end{aligned} \quad (15)$$

其中, $\mathbf{H} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{A} \mathbf{T}$; $\bar{\mathbf{C}} = \mathbf{C} \mathbf{T}$; $\mathbf{x}$ 为状态变量; $\mathbf{y}$ 为观测变量; $\mathbf{z}$ 为中间状态变量。则有:

$$\mathbf{z}_k(t) = e^{\lambda_k t} \mathbf{z}_{k0} \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

根据式(15)的输出方程可得:

$$\mathbf{y}_k(t) = \sum_{i=1}^n \bar{c}_{ki} \mathbf{z}_i = \sum_{i=1}^n \bar{c}_{ki} \mathbf{z}_{i0} e^{\lambda_i t} \quad (17)$$

其中, $\bar{c}_{ki}$ 为矩阵 $\bar{\mathbf{C}}$ 的第 i 行第 k 列元素。

进而定义基于响应的参与因子 p_{ki} :

$$p_{ki} = \bar{c}_{ki} \mathbf{z}_{i0} \quad (18)$$

其中, $k = 1, 2, \dots, m$; $i = 1, 2, \dots, n$ 。

为了计算基于响应的参与因子 p_{ki} ,需首先计算中间状态变量 $\mathbf{z}$ 的初值 $\mathbf{z}_0$:

$$\mathbf{z}_0 = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{x}_0 \quad (19)$$

其中, $\mathbf{x}_0 = \boldsymbol{\varphi} = [\boldsymbol{\varphi}_1, \boldsymbol{\varphi}_2, \dots, \boldsymbol{\varphi}_n]$,即为利用式(11)计算得到的特征向量矩阵^[12], $\boldsymbol{\varphi}_i$ 为与 λ_i 对应的特征向量。

基于响应的参与因子 p_{ki} 的大小反映了量测状态量 $\mathbf{y}_k$ 在模态 i 中的能控性。本文以发电机角频率作为量测状态量,计算得到基于响应的参与因子反映了发电机在相应模态中的能控性。

2.2 机电振荡参数识别与评估流程

基于 SSI 理论的电力系统机电振荡特征识别与评估流程见图 1。首先利用 SSI 算法对从 PDC(Phasor Data Concentrator)中获取的发电机动态角频率信号进行计算,得到状态矩阵 $\mathbf{A}_d$ 及观测矩阵 $\mathbf{C}$,对状态矩阵进行特征分解计算得到特征值及相应的特征向量,利用 1.2 节中的机电振荡特征参数计算方法及 2.1 节中的基于响应的参与因子计算方法计算得到相关的振荡频率、阻尼比、模态振型及参与因子,从而实现电力系统机电振荡特征参数识别与能控性评估。

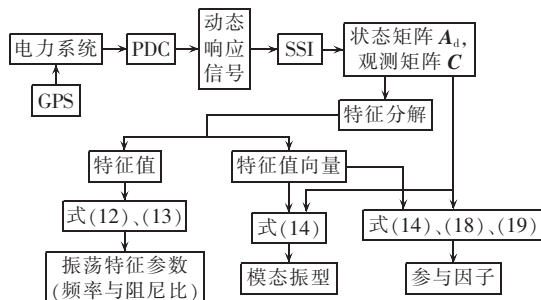


图 1 低频振荡特征识别与评估流程
Fig.1 Flowchart of low-frequency oscillation characteristics identification and evaluation

3 数字仿真分析

本节将以 IEEE 39 节点系统为例对本文提出的基于动态响应的机电振荡特征识别方法及系统能控性量化评估方法进行数字仿真分析。IEEE 39 节点系统结构如图 2 所示,系统详细描述及数据参见文献[16]。

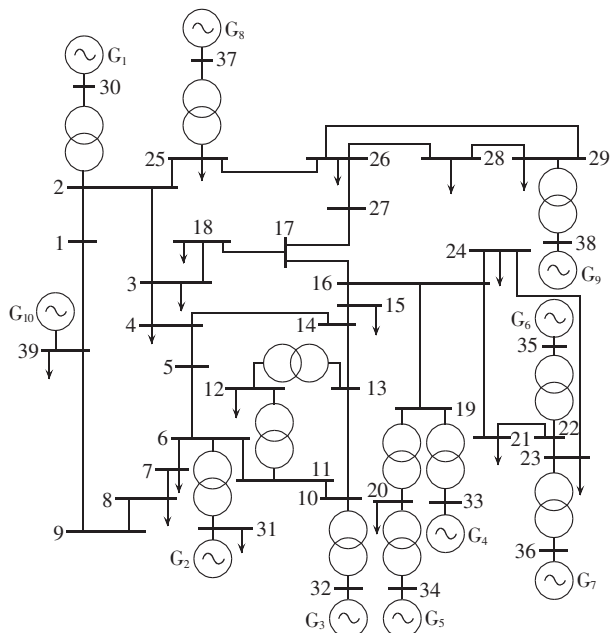


图 2 IEEE 39 节点系统单线图

Fig.2 Single-wire diagram of IEEE 39-bus system

本文提出的基于动态响应的机电振荡特征识别及系统能控性量化评估方法具有十分广泛的应用场景,既可应用于基于 WAMS 的电力系统低频振荡在线分析与辅助决策中,又可应用在特定运行方式下低频振荡离线分析中。本节将对本文方法在不同应用场景下的效果进行仿真计算与分析。

3.1 场景 1:离线分析

利用电力系统综合分析程序(PSASP)的小干扰稳定分析模块计算得到 IEEE 39 节点系统 9 个机电振荡模式特征值如表 1 所示,模态图如图 3 所示。

从表 1 所示数据中不难看出,模式 7 及模式 9 的阻尼比均小于 5%,属于典型的弱阻尼模式,这 2 个

表 1 特征值计算结果(正常方式)

Tab.1 Calculated eigenvalues(normal operation)

模式	实部	虚部	频率/Hz	阻尼比/%
1	-1.6144	8.8834	1.4138	17.88
2	-0.4528	8.8323	1.4057	5.12
3	-0.3944	7.6991	1.2253	5.11
4	-0.6263	7.2425	1.1526	8.61
5	-1.5773	6.9395	1.1044	22.16
6	-1.1571	6.7494	1.0742	16.89
7	-0.1697	6.7102	1.0679	2.52
8	-0.4877	6.5944	1.0495	7.37
9	-0.0528	3.9348	0.6262	1.34

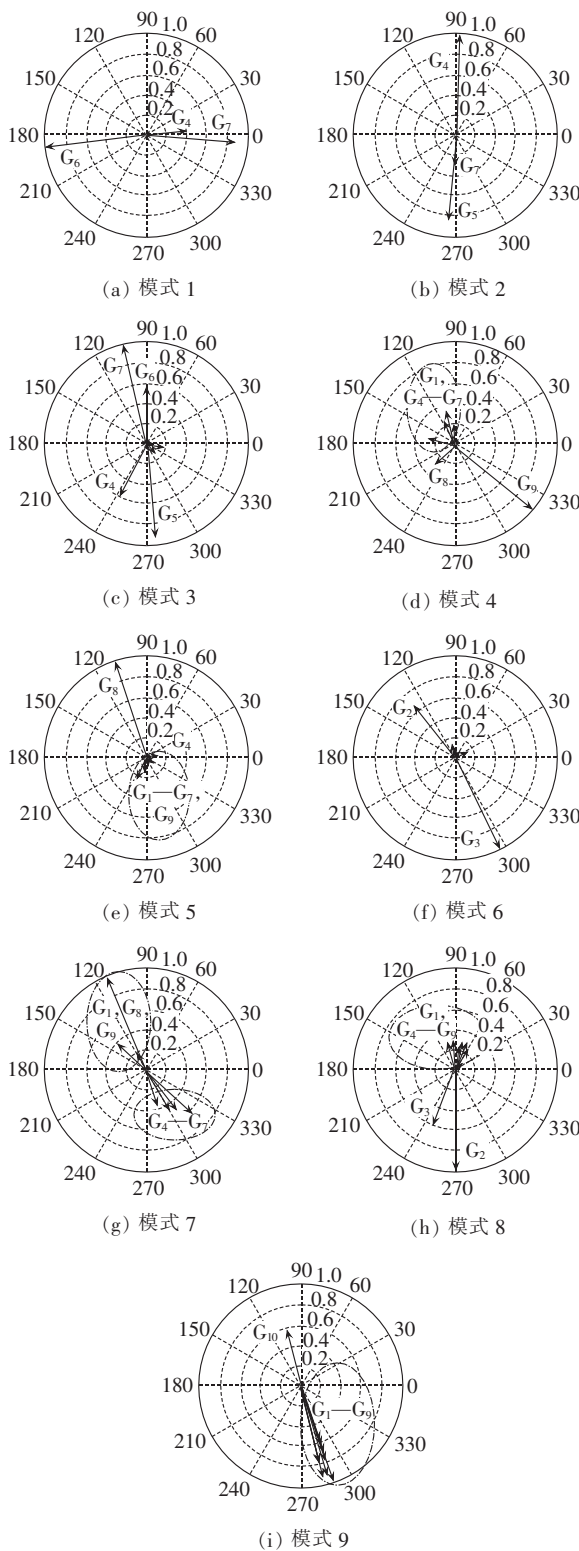


图 3 正常运行方式下理论模态图

Fig.3 Theoretical modal chart under normal operational mode

弱阻尼模式是运行人员较为关心的模式,也是极易被激发的模式。

为验证本文方法在离线分析中的可行性,分别设置 2 种小扰动:在发电机 G_3 励磁系统中施加冲击扰动(case 1);母线 24 设置随机负荷扰动(case 2)。

利用本文提出的 SSI 方法对受扰后系统中各发电机角频率的动态响应进行计算,2 种扰动方式下的机电振荡特征识别结果如表 2 所示。利用式(14)分别计算 2 种扰动方式所激发出的相应振荡模式的模态,并绘制模态图,结果如图 4 所示。图 4 所示的模态振型图直观地表现了不同模态中发电机组间的振

荡关系及分群情况。对比图 4 及图 3 所示的理论模态,不难看出,对于具有相近振荡参数的模态,本文方法所得结果与理论模态具有一致的振荡特征,各振荡机群所包含的发电机亦相同。

对比表 2 和表 1 数据可以看出,利用本文识别方法得到的机电振荡模式完全包含于小信号分析结果中,且所得结果均为阻尼比较小的易被激发模式。对比 case 1 扰动方式下 1.0107 Hz、case 2 扰动方式下 0.9837 Hz 模式及理论模态中 1.0679 Hz 模式对应的模态图不难看出,3 幅模态图(图 4 中模式 4(case 1)和模式 2(case 2)及图 3 模式 7)所表征的模式中相关发电机分群情况相同,具有相同的振荡特征,由此表明,运行人员较为关注的理论模态中第 1 个弱阻尼模式在 2 种扰动方式下均被激发出来。同理,通过模态振型图的对比,运行人员较为关注的理论模态中第 2 个弱阻尼模式在 2 种扰动方式下同样被激发出来。

在传统小信号分析方法中,作为重要参量的参与因子反映了不同发电机在某一振荡模式中的可控性。相对于传统基于信号的低频振荡分析方法,本文提出的基于 SSI 的机电振荡参数识别方法,在获取振荡参数的同时,能够计算得到各发电机在不同振荡模式中的参与因子,进而分析各发电机的可控性。限于篇幅,本文只对弱阻尼模式进行了分析,2 种弱阻尼模式中各发电机参与因子的理论值与基于响应的参与因子对比结果如图 5 所示。

由图 5 结果可以看出,本文提出的基于响应的参与因子计算结果与理论结果具有相同的趋势,利用基于响应的参与因子对系统可控性进行分析可以

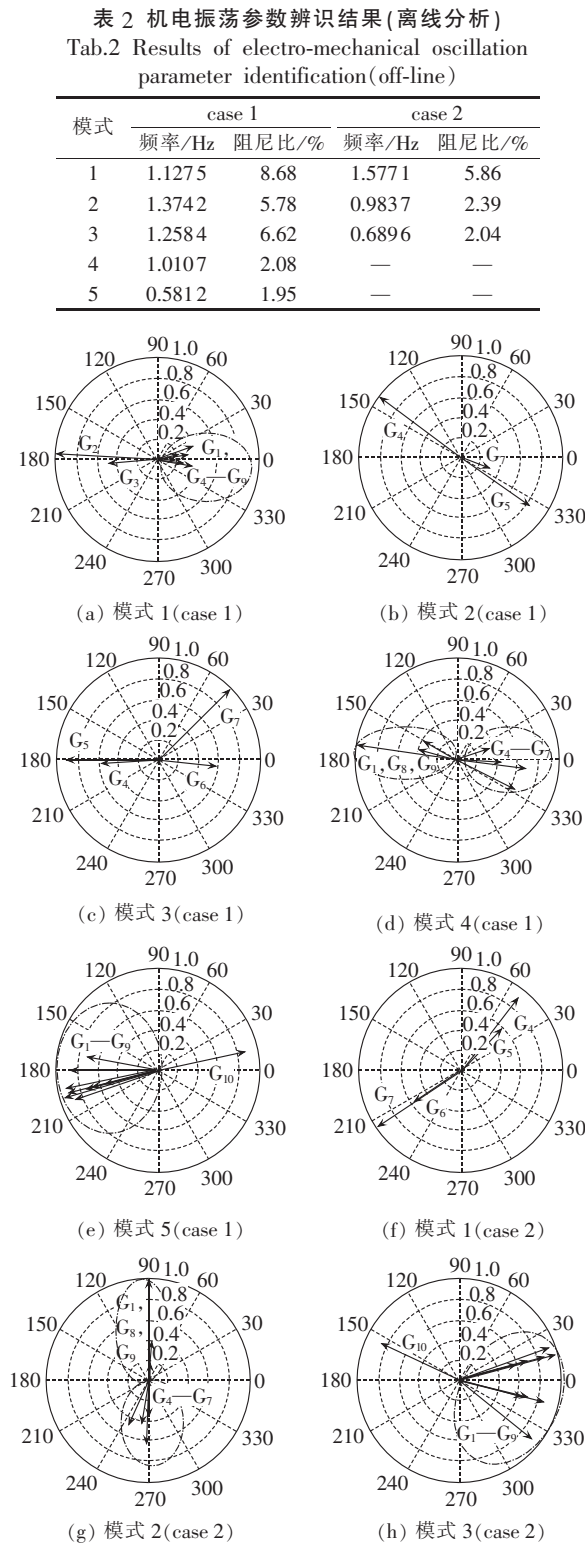


图 4 模态图辨识结果(离线分析)
Fig.4 Results of modal chart identification(off-line)

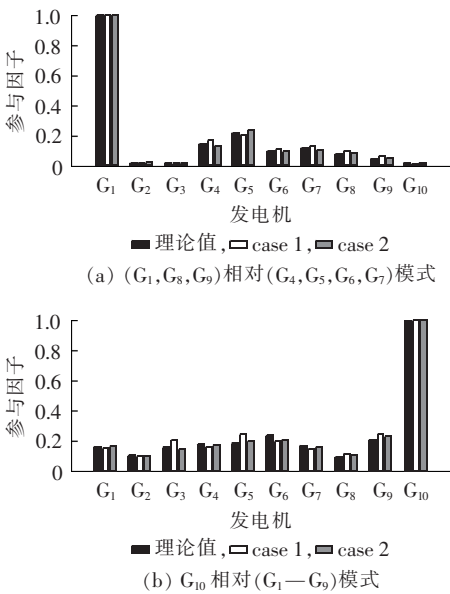


图 5 参与因子辨识结果(离线分析)
Fig.5 Results of participation factor identification(off-line)

获取与小信号分析方法相同的结果。

上述分析结果表明,通过施加微小扰动获取系统动态响应,利用本文提出的基于响应的机电振荡参数识别及系统可控性分析方法,能够提取运行人员较为关注的弱阻尼关键模式,且结果与传统小信号分析方法基本一致,同时能够避免传统小信号分析方法中由“维数灾”带来的特征值计算困难等难题。

3.2 场景 2:在线分析

随着智能电网的不断建设和发展^[17-18],现代电力系统中大容量发电厂及枢纽变电站将逐步安装相量测量单元(PMU),以实现大规模电力系统的实时监测与控制,这也为本文提出的基于响应的机电振荡参数识别及可控性量化分析的在线应用提供了新的技术平台和契机。

假设 IEEE 39 节点算例系统中全部发电机均已安装 PMU,受扰后的发电机角频率动态响应可实时上传至系统调控中心。假设算例系统中线路 16-17 因故障切除,利用本文方法对受扰后系统中各发电机角频率的动态响应进行计算,结果如表 3 所示,模态图如图 6 所示。表 4 为线路 16-17 切除后的小信号稳定分析结果,相应的模态图见图 7。对比表 3、

表 4 数据,及相对应的模态图不难发现,利用本文提出的基于响应的机电振荡参数识别方法计算得到的模式仍包含在线路 16-17 切除后的小信号稳定分析结果中,且振荡特征相同,该结果进一步表明了本文方法对运行方式变化具有较强的鲁棒性。

有功功率控制仍然是现阶段抑制低频振荡最为

表 3 机电振荡参数辨识结果(在线分析)

Tab.3 Results of electro-mechanical oscillation parameter identification(on-line)

模式	频率/Hz	阻尼比/%
1	0.8905	3.78
2	0.6896	0.93

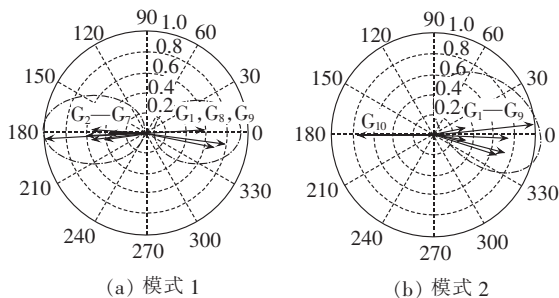


图 6 模态图辨识结果(在线分析)

Fig.6 Results of modal chart identification(on-line)

表 4 特征值计算结果(16-17 断开方式)

Tab.4 Calculated eigenvalues (outage of line 16-17)

模式	实部	虚部	频率/Hz	阻尼比/%
1	-3.7880	10.9651	1.7451	32.65
2	-0.7080	9.4323	1.5012	7.48
3	-0.5532	8.4102	1.3385	6.56
4	-1.6190	7.6984	1.2252	20.58
5	-0.3903	7.3937	1.1767	5.27
6	-0.3875	6.8585	1.0915	5.64
7	-0.2218	6.6541	1.0590	3.33
8	-0.1117	5.4997	0.8753	2.03
9	-0.0454	3.8593	0.6142	1.17

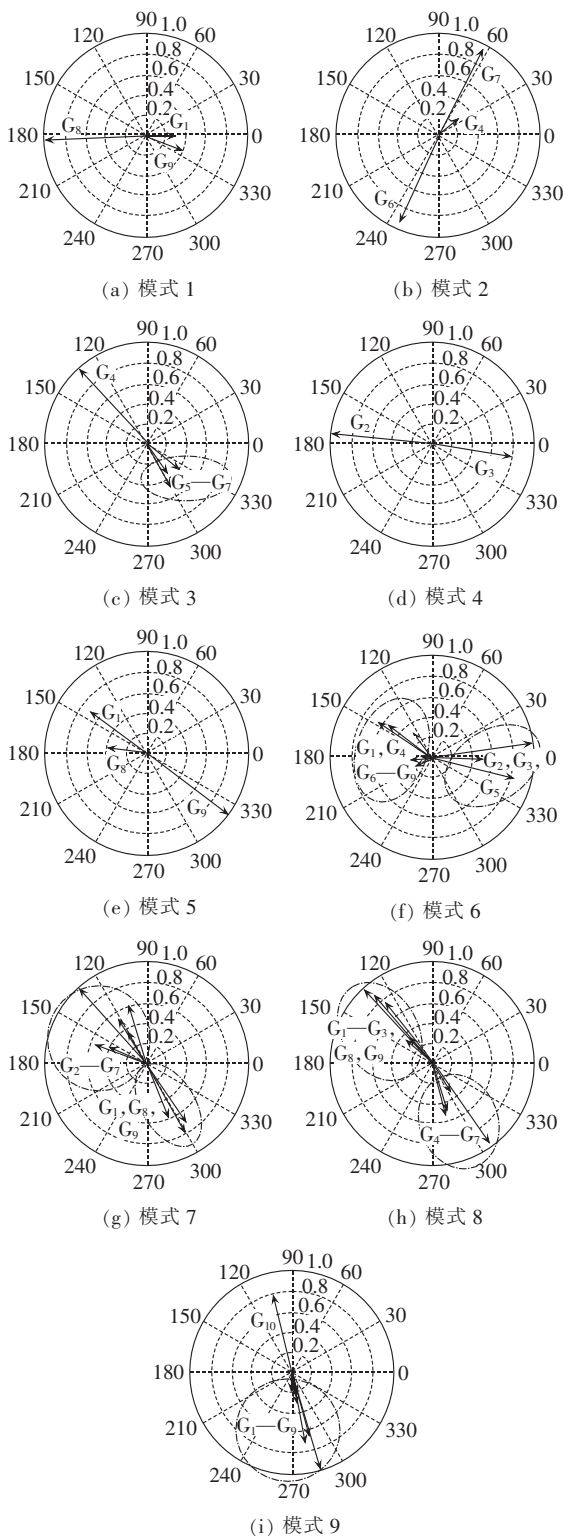


图 7 16-17 断线方式下理论模态图

Fig.7 Theoretical modal chart(outage of line 16-17)

有效的控制方式之一,但目前基于信号的低频振荡在线分析方法提供的信息仍限于振荡频率、阻尼等振荡参数,对于指导在线实时控制的作用很小。而本文提出的方法在获取相关机电振荡参数的同时,计算得到的基于响应的参与因子能够根据受扰后系统的实时响应实现各发电机的能控性的量化评估。

图 8 为本文方法计算得到基于响应的参与因子与理论值的对比结果。图 8 所示结果中,基于响应的参与因子与线路 16-17 切除后参与因子的理论值具有相同的趋势,能够用于在线实时对发电机能控性进行量化评估,对指导运行人员实施紧急功率控制具有重要意义。

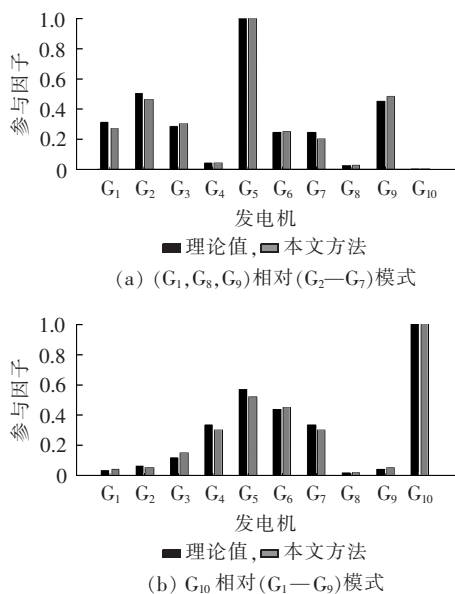


图 8 参与因子辨识结果(在线分析)

Fig.8 Results of participation factor identification(on-line)

4 结语

针对传统小信号分析方法在分析大电网机电振荡特征中存在的“维数灾”问题,以及现有基于信号的低频振荡方法提供信息有限的缺点,本文在深入研究 SSI 理论的基础上,提出了基于响应的大规模电力系统机电振荡特征识别及系统能控性量化评估方法。SSI 方法在多信号系统处理中的独特优势,使得本文方法在准确识别振荡特征参数的同时,能够计算得到不同模式下各发电机的参与因子,进而实现系统能控性的量化评估,为运行人员提供更加丰富的信息,指导运行人员采取相应的控制措施对弱阻尼振荡模式进行控制。数值仿真计算与分析充分证明了本文方法的有效性和对运行方式的鲁棒性。

参考文献:

[1] 陈中. 电力系统小干扰稳定实时控制[J]. 电力自动化设备,2012,

32(3):42-46.

CHEN Zhong. Real-time stability control of power system with small disturbance[J]. Electric Power Automation Equipment,2012, 32(3):42-46.

[2] 徐伟,鲍颜红,徐泰山,等. 电力系统低频振荡实时控制[J]. 电力自动化设备,2012,32(5):98-101.

XU Wei,BAO Yanhong,XU Taishan,et al. Real-time control of power system low-frequency oscillation[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(5):98-101.

[3] CIGRE Task Force 38.01.07 on Power System Oscillations. Analysis and control of power system oscillations [C]//CIGRE. Paris, France:[s.n.],1996:15-21.

[4] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York, USA:McGraw Hill Inc,1994:714-716.

[5] TERZIJA V,VALVERDE G,CAI Deyu,et al. Wide-area monitoring,protection,and control of future electric power networks [J]. Proceedings of the IEEE,2011,99(1):80-92.

[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] 郭成,李群湛,王德林. 互联电力系统低频振荡的广域 Prony 分析[J]. 电力自动化设备,2009,29(5):69-73.

GUO Cheng,LI Qunzhan,WANG Delin. Wide-area Prony analysis of low frequency oscillation in interconnected power system [J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(5):69-73.

[8] 潘学萍,扈卫卫,尚霏. 多信号模态参数识别的小波方法[J]. 电力自动化设备,2013,33(5):31-36.

PAN Xueping,HU Weiwei,SHANG Fei. Wavelet analysis based modal parameter identification from multiple signals[J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(5):31-36.

[9] 李天云,高磊,赵妍. 基于 HHT 的电力系统低频振荡分析[J]. 中国电机工程学报,2006,26(14):24-30.

LI Tianyun,GAO Lei,ZHAO Yan. The analysis for low frequency oscillation based on HHT[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26 (14):24-30.

[10] SAMIR A,AMIR N,MIRZA K. Wavelet transform applications in power system dynamics[J]. Electric Power Systems Research, 2012,78(2):237-245.

[11] 蔡国伟,杨德友,张俊丰,等. 基于实测信号的电力系统低频振荡模态辨识[J]. 电网技术,2011,35(1):59-65.

CAI Guowei,YANG Deyou,ZHANG Junfeng,et al. Mode identification of power system low-frequency oscillation based on measured signal[J]. Power System Technology,2011,35(1):59-65.

[12] HASHLAMOUN W A. New results on modal participation factors:revealing a previously unknown dichotomy[J]. IEEE Trans on Automatic Control,2009,54(7):1439-1449.

[13] van OVERSCHEE P,DEMOOR B. Subspace identification for linear systems [M]. [S.l.]:Kluwer Academic Publishers,1996: 57-61.

[14] REYNDERS E,de ROECK G. Reference-based combined deterministic-stochastic subspace identification for experimental and operational modal analysis[J]. Mechanical Systems and Signal Processing,2008,22(3):617-637.

[15] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2002:276-279.

- [16] 蔡国伟. 电力系统暂态稳定性的支路暂态势能分析方法[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,1999.
CAI Guowei. Branch transient potential energy method for transient stability analysis in power system[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,1999.
- [17] 刘振亚. 智能电网技术[M]. 北京中国电力出版社,2010:53-68.
- [18] 徐遐龄,林涛,高玉喜,等. 基于 CBR 和 OAPID 的互联电网区间模式振荡预警[J]. 电力自动化设备,2013,33(8):88-93.
XU Xialing, LIN Tao, GAO Yuxi, et al. Warning of inter-area mode oscillation based on CBR and OAPID for interconnected power grids[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(8):88-93.

作者简介:



杨德友

杨德友(1983-),男,黑龙江齐齐哈尔人,实验师,博士研究生,研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail:eedyyang@hotmail.com);

蔡国伟(1968-),男,吉林吉林人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统稳定与控制;

陈家荣(1965-),男,香港人,副教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统数字仿真与优化控制。

Characteristics extraction and controllability evaluation based on dynamic response of electro-mechanical oscillation

YANG Deyou¹, CAI Guowei¹, CHAN K W²

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Dianli University, Jilin 132012, China;

2. Department of Electrical Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hong Kong 999077, China)

Abstract: The system identification theory based on SSI (Stochastic Subspace Identification) algorithm is researched, a method of electro-mechanical oscillation characteristics identification based on SSI is designed for power system and a method of participation factor calculation based on response is proposed, by which the quantitative evaluation of system controllability is realized. The proposed method is applied to calculate the dynamic angular frequency response of each generator in a system and the system electro-mechanical oscillation characteristics can be globally analyzed to effectively avoid the defect of traditional low-frequency oscillation analysis with insufficient information based on single signal. Simulative results of IEEE 39-bus system show its high identification accuracy and calculation efficiency.

Key words: electric power systems; electro-mechanical oscillation; controllability; stochastic subspace; participation factor; dynamic response; stability

(上接第53页 continued from page 53)

HU Yihua, CHEN Hao, XU Ruidong, et al. PV module characteristics effected by shadow problem[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(1):123-128.

- [23] 李兴鹏,石庆均,江全元. 双模糊控制法在光伏并网发电系统 MPPT 中的应用[J]. 电力自动化设备,2012,32(8):113-117.
LI Xingpeng, SHI Qingjun, JIANG Quanyuan. Application of double fuzzy control in MPPT of grid-connected photovoltaic generation system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(8):113-117.

作者简介:



徐青山

徐青山(1979-),男,江苏泰州人,教授,博士,从事分布式发电与微电网研究(E-mail:xuqingshan@seu.edu.cn);

钱海亚(1990-),男,江苏扬州人,硕士研究生,从事分布式发电与微电网研究;

陈楷(1972-),男,湖南岳阳人,高级工程师,硕士,从事配电规划与运行研究。

Super capacitor compensation strategy for PV anti-mismatch under short-time partial shadows

XU Qingshan¹, QIAN Haiya¹, CHEN Kai²

(1. Engineering Research Centre of Motion Control, Ministry of Education, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Nanjing Power Supply Corporation, Jiangsu Power Company, Nanjing 210008, China)

Abstract: Photovoltaic modules may operate in mismatch mode because of partial shadow. Because the duration of partial shadow is normally short, it is proposed to apply the parallel super capacitor to power compensation. The differential equation model of photovoltaic module with parallel super capacitor is established, based on which, its operational features and voltage/power variation characteristics are analyzed. The contrast results between the proposed super capacitor compensation method and traditional diode compensation method in compensation mode and operational features show that, the super capacitor compensation method can improve the characteristics of the photovoltaic system, increase the output voltage and stable the output power more effectively under short-time partial shadows. Its key issues in practical application are discussed. The concept of optimal working range and maintenance time is defined and the way to obtain the matching relationship between super capacitor and maintenance time is proposed.

Key words: photovoltaic modules; photovoltaic cells; mismatch mode; compensation; light intensity; maintenance time