

DOI: 10.7667/PSPC161760

经验 Gramian 平衡降阶在电力系统中的改进及应用

赵洪山, 兰晓明, 米增强

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003)

摘要: 经验 Gramian 平衡降阶方法正逐步应用于电力系统的非线性控制设计。如何获得有效经验可观可控 Gramian 矩阵, 是该方法应用的核心, 对降阶效果有着很大影响。为进一步提升该方法的降阶效果, 建立了电力系统非线性动态模型, 分析了所研究问题与控制量选取及降阶对象之间的关系。考虑了电力系统状态量及控制量变化特点, 提出了一种方案用于确定各状态量和控制量的扰动值, 形成了包含丰富系统动态行为信息的经验可观可控 Gramian 矩阵。通过研究某实际电网验证该方案可行有效, 研究表明相比原方法, 所提方案在保证降阶误差上界的前提下, 能够进一步有效减少模型阶数, 其降阶效果得到明显提升。

关键词: 电力系统; 非线性模型; 平衡降阶; 经验 Gramian; 可观可控

Improvement and application of empirical Gramian balance reduction in power system

ZHAO Hongshan, LAN Xiaoming, MI Zengqiang

(School of Electrical and Electronics Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The empirical Gramian balance reduction method is gradually applied to the nonlinear control and design of power system. How to obtain effective empirical controllability and observability Gramian matrices is the core of this method. In order to further improve the reduced effect, this paper forms nonlinear dynamic model of power system and analyzes the relationship of among research problem, the choice of control variables and reduction object. Given the variation characteristic of state and control variables, this paper proposes a scheme which is used to determine the disturbed values of state and control variables to form empirical controllability and observability Gramian matrices which contains rich system dynamic behaviors information. It takes advantage of some relative power system to verify the effectiveness of the proposed scheme. The simulation results show that this scheme can further decrease the reduced order and the effect of reduced model are improved greatly on the premise of guarantee the upper bound of error for order reduction.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51077053).

Key words: power system; nonlinear model; balanced reduction; empirical Gramian; controllability and observability

0 引言

电力系统模型降阶的主要方法有: 同调等值理论^[1-3]、奇异摄动方法^[4-6]、解耦方法^[7-8]以及 Gramian 平衡降阶方法^[9]等。其中, 经验 Gramian 平衡降阶方法对非线性模型的状态量和控制量逐一进行扰动, 获得样本数据, 计算经验可观可控 Gramian 矩阵, 进行平衡变换和 Galerkin 投影, 实现非线性动态模型的降阶。相比其他方法, 它的优点是: 关注降阶模型保持原模型动态行为和输入、输出特性的

问题, 更加适合应用于控制设计的模型降阶; 降阶模型能够保留原模型的稳定性, 并且其输出误差存在上界; 任何一阶降阶模型描述的都是原模型所有状态量线性组合的动态行为。

目前, 该方法在电力系统中的研究主要有: 如何使用经验 Gramian 平衡降阶方法进行电力系统非线性动态模型降阶及该方法有效性的算例验证^[10], 降阶模型状态量与原模型状态量的关系^[11]; 模型预测控制中如何应用该方法降低优化计算时间^[12]; 负荷建模中应用该方法进行感应电动机群聚合^[13]等。

现有研究中降阶对象多为发电机、网络、恒阻抗负荷模型构成的非线性微分方程, 但未考虑非线性

性静态负荷模型。文献中系统的微分方程多是根据发电机与网络接口的电流代数方程消去发电机动态方程中电流这个代数量获得的。但电力系统动态模型一般采用非线性微分代数方程形式,多用潮流方程进行机网联接。同时,现有研究中,未说明所研究问题与控制量选取及降阶对象之间的关系。这些在一定程度上限制了经验 Gramian 平衡降阶方法在电力系统中的应用。

另外,现有研究未详细阐述扰动值的选取方法,在如何获取更加有效的样本数据方面,相关研究也很少。由于经验 Gramian 平衡降阶方法多应用于化工过程,如何结合电力系统特点获得有效样本数据以及上述过程中需要注意的问题,这些对降阶模型的动态行为都有着很大影响,具有重要的研究价值。

基于上述分析,本文对考虑非线性静态负荷模型的、以电压幅值和相角为代数量的电力系统非线性微分代数方程进行经验 Gramian 平衡降阶研究,并根据研究问题确定降阶对象。同时,考虑电力系统状态量及控制量变化特点,提出一种方案用于确定各状态量和控制量的扰动值,获取更加有效的样本数据。

1 电力系统非线性微分代数方程

1.1 发电机、网络、负荷模型

为提高降阶模型的精度,发电机采用六阶动态模型^[14]

$$\begin{cases} \dot{\delta} = \omega_s(\omega - 1) \\ T_j \dot{\omega} = T_m - T_e - D(\omega - 1) \\ T'_{d0} \dot{E}'_d = E_f - E'_d + (x_d - x'_d)I_d \\ T'_{q0} \dot{E}'_q = -E'_q - (x_q - x'_q)I_q \\ T''_{d0} \dot{E}''_d = E'_d - E''_d + (x'_d - x''_d)I_d \\ T''_{q0} \dot{E}''_q = E'_q - E''_q - (x'_q - x''_q)I_q \end{cases} \quad (1)$$

式中: δ 为发电机转子角; ω 为发电机角频率; ω_s 为发电机额定角频率; T_m 为原动机机械力矩; T_e 为发电机电磁力矩, $T_e = U_d I_d + U_q I_q + r_a I^2$, r_a 为发电机的定子绕组电阻, I_d, I_q, U_d, U_q 分别为发电机 d 轴和 q 轴的电流和电压; $T'_{d0}, T'_{q0}, T''_{d0}, T''_{q0}$ 分别为发电机 d 轴和 q 轴开路暂态、次暂态时间常数; T_j 为发电机转动惯量; E'_d, E'_q, E''_d, E''_q 分别为发电机 d 轴和 q 轴暂态、次暂态电势; E_f 为励磁电压; D 为发电机定常阻尼系数; $x_d, x_q, x'_d, x'_q, x''_d, x''_q$ 分别为发电机 d 轴和 q 轴同步、瞬变、超瞬变电抗。

$$\begin{cases} I_q = (r_a E'_q - x''_d E''_d - r_a U_q + x''_d U_d) / (r_a^2 + x''_d x''_q) \\ I_d = (r_a E'_d + x''_q E''_q - r_a U_d - x''_q U_q) / (r_a^2 + x''_d x''_q) \\ U_d = U_g \sin(\delta - \theta) \\ U_q = U_g \cos(\delta - \theta) \end{cases} \quad (2)$$

用式(2)消去式(1)中的代数量,即发电机 dq 轴电压及电流,形成只含状态量 $[\delta, \omega, E'_d, E'_q, E''_d, E''_q]$ 、控制量 $[T_m, E_f]$ 以及发电机机端电压幅值和相角 (U_g, θ) 的微分方程。

发电机有功、无功功率 P_g, Q_g 可描述为

$$\begin{cases} P_g = U_d I_d + U_q I_q \\ Q_g = U_q I_d - U_d I_q \end{cases} \quad (3)$$

同样用式(2)消去式(3)中的代数量,式(3)变为

$$\begin{cases} P_g = \frac{U_g}{r_a^2 + x''_d x''_q} \{ [r_a \sin(\delta - \theta) - x''_d \cos(\delta - \theta)] E''_d + \\ [r_a \cos(\delta - \theta) + x''_q \sin(\delta - \theta)] E''_q + \\ [0.5(x''_d - x''_q) \sin 2(\delta - \theta) - r_a] U_g \} \\ Q_g = \frac{U_g}{r_a^2 + x''_d x''_q} \{ [r_a \cos(\delta - \theta) + x''_d \sin(\delta - \theta)] E''_d + \\ [x''_d \cos(\delta - \theta) - r_a \sin(\delta - \theta)] E''_q - \\ [x''_d \sin^2(\delta - \theta) + x''_q \cos^2(\delta - \theta)] U_g \} \end{cases} \quad (4)$$

非线性静态负荷模型的代数方程为^[14]

$$\begin{cases} P_l = P_{l0} [a_p (U_l / U_{l0})^2 + b_p (U_l / U_{l0}) + c_p] \\ Q_l = Q_{l0} [a_q (U_l / U_{l0})^2 + b_q (U_l / U_{l0}) + c_q] \end{cases} \quad (5)$$

式中: a_p, b_p, c_p 分别为恒阻抗、恒电流、恒功率负荷的有功功率占总功率的百分比; a_q, b_q, c_q 分别为恒阻抗、恒电流、恒功率负荷的无功功率占总无功功率的百分比; $a_p + b_p + c_p = 1, a_q + b_q + c_q = 1$; P_{l0}, Q_{l0} 分别为负荷有功和无功功率的基准点稳态运行值; P_l, Q_l 分别为负荷的有功和无功功率; U_l, U_{l0} 分别为负荷电压及其基准点稳态运行值。

潮流方程可描述为

$$\begin{cases} P_i = U_i^2 G_{ii} + U_i \sum_{j=1}^{j \neq i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = -U_i^2 B_{ii} + U_i \sum_{j=1}^{j \neq i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (6)$$

式中, G, B 分别为节点导纳矩阵的实部和虚部。

式(4)—式(6)联立实现发电机、网络、负荷的联接。

1.2 原动机调速器、励磁控制器模型

原动机调速器模型^[14]为

$$\begin{cases} T_s \dot{\mu}_1 = \mu_3 + (\mu_2 + T_3 \mu_1 / T_c) T_4 / T_5 + (\omega_{ref} - \omega) / R \\ T_c \dot{\mu}_2 = (1 - T_3 / T_c) \mu_1 - \mu_2 \\ T_5 \dot{\mu}_3 = (\mu_2 + T_3 / T_c \mu_1) (1 - T_4 / T_5) - \mu_3 \end{cases} \quad (7)$$

式中: μ_1, μ_2, μ_3 为该模型的状态量; ω_{ref} 为发电机角频率设定值; $T_m = \mu_3 + (\mu_2 + T_3\mu_1/T_c)T_4/T_5$; T_c, T_3, T_4, T_5 为时间常数; R 为静态增益。

励磁控制器模型^[14]为

$$\begin{cases} T_A \dot{U}_R = -U_R + K_A(U_{\text{ref}} - U_g - U_F) \\ T_L \dot{E}_f = -(K_L + S_E)E_f + U_R \\ T_F \dot{U}_F = -U_F + K_F/T_L(U_R - (K_L + S_E)E_f) \end{cases} \quad (8)$$

式中: U_R 为电压调节器输出电压; U_F 为励磁负反馈电压; U_{ref} 为电压设定值; K_A, K_F 分别为电压调节器和励磁稳定器的静态增益; T_A, T_L, T_F 分别为电压调节器、励磁机和励磁稳定器的时间常数; K_L 为与励磁方式相关的常数; S_E 为励磁饱和系数, 是 E_f 的函数 $S_E = \varphi(E_f)$ 。

1.3 根据研究问题确定降阶对象

上述部分详细阐述了电力系统各元件及控制器的模型及互联方法。在应用 Gramian 平衡降阶方法过程中, 因研究问题不同, 需要确定不同的降阶对象, 相应地, 模型的控制量、状态量和输出量会发生变化。由于 Gramian 平衡降阶是一种关注降阶模型保持原模型动态行为和输入、输出特性的方法, 在确定降阶对象的过程中, 需要分离降阶对象和控制器。

例如, 研究电力系统多机励磁控制器设计问题, 忽略原动机调速器作用, 机械转矩恒定, 降阶对象可由式(4)一式(6), 加之处理后的式(1)构成, 控制量为 E_f 。若研究电力系统暂态仿真问题, 降阶对象由式(4)一式(6), 加之处理后的式(1)以及式(7)、式(8)构成, 控制量为 $\omega_{\text{ref}}, U_{\text{ref}}, \omega_{\text{ref}}, U_{\text{ref}}$ 的设定值在仿真过程中恒定; 降阶对象也可以由式(4)一式(6), 加之处理后的式(1)构成, 控制器模型由式(7)、式(8)构成, 控制量为 T_m, E_f 。若研究电力系统二级电压控制器设计问题, 忽略原动机调速器作用, 机械转矩恒定, 降阶对象由式(4)一式(6), 加之处理后的式(1)以及式(8)构成, 控制量为 U_{ref} 。

所确定的降阶对象一般形式可表达为

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{x}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{x}, \mathbf{z}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: \mathbf{x} 是状态量; \mathbf{z} 是代数量; \mathbf{y} 是输出量; \mathbf{u} 是控制量, 它们的数值可由量测系统^[15]提供。

2 经验 Gramian 平衡降阶

2.1 经验 Gramian 平衡降阶原理

Gramian 平衡降阶是一种根据状态量对系统输

入、输出动态行为的贡献进行模型降阶的方法。在控制理论中, 常常将控制输入对状态量的影响称为可控性, 使用可控 Gramian 矩阵 \mathbf{W}_C 描述; 将输出量反映状态量的能力称为可观性, 使用可观 Gramian 矩阵 \mathbf{W}_O 描述; 可控性和可观性可表述为系统输入、输出特性^[16]。形成 Gramian 矩阵的过程也是对系统的动态行为提取的过程。

对于线性系统, Gramian 矩阵是系统 Lyapunov 方程的解, 当线性系统模型确定后, 不难获得其对应的 \mathbf{W}_C 和 \mathbf{W}_O 。而对于非线性系统, 其 Lyapunov 方程很难确定, 往往利用仿真或实验数据计算其对应的经验 Gramian 矩阵, 计算公式为

$$\mathbf{W}_C = \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^s \sum_{i=1}^d \frac{1}{rsc_m^2} \sum_{k=0}^h \Phi^{ilm}(k) \quad (10)$$

$$\mathbf{W}_O = \sum_{l=1}^r \sum_{m=1}^s \frac{1}{rsc_m^2} \sum_{k=0}^h T_l \Psi^{ilm}(k) T_l^T \quad (11)$$

式中: r 为激励或扰动方向的数量, 一般取 2; s 为在每个方向上不同扰动大小的数量; d 为系统输入个数; \mathbf{T} 为 r 个正交矩阵; h 为采样数据的列数; $\Phi^{ilm}(k) = (x^{ilm}(k) - x_{ss}^{ilm})(x^{ilm}(k) - x_{ss}^{ilm})^T$, $x^{ilm}(k)$ 为与输入脉冲 $u(k) = c_m T_l e_i \delta(k) + u_{ss}$ 对应的状态, c_m 为输入大小, $T_l e_i$ 为输入方向, $\delta(k)$ 为输入脉冲, x_{ss}^{ilm} 和 u_{ss} 分别为系统稳定状态下的状态值和输入值; $\Psi_{ij}^{ilm}(k) = (y^{ilm}(k) - y_{ss}^{ilm})^T (y^{ilm}(k) - y_{ss}^{ilm})$, $y^{ilm}(k)$ 为与初始条件 $x(0) = c_m T_l e_i \delta(k) + x_{ss}$ 对应的输出, y_{ss}^{ilm} 和 x_{ss} 分别为系统稳定状态下的输出值和状态值。

对任意线性或非线性系统而言, \mathbf{W}_C 和 \mathbf{W}_O 往往是不相等的, 则某一状态量对系统输入、输出的影响也是不相同的, 在模型降阶过程中就难以取舍该状态量。平衡实现采用坐标变换的方式将原系统映射到平衡系统来解决上述问题^[17]。变换后, 平衡系统有着与原系统完全一致的动态行为。在平衡系统中, 可控 Gramian 矩阵 $\bar{\mathbf{W}}_C$ 和可观 Gramian 矩阵 $\bar{\mathbf{W}}_O$ 是相等的, 即某一状态量对系统输入、输出的影响是相同的。 \mathbf{W}_C 与 $\bar{\mathbf{W}}_C$ 的关系为 $\bar{\mathbf{W}}_C = \mathbf{T} \mathbf{W}_C \mathbf{T}^T$, \mathbf{W}_O 和 $\bar{\mathbf{W}}_O$ 的关系为 $\bar{\mathbf{W}}_O = (\mathbf{T}^{-1})^T \mathbf{W}_O \mathbf{T}^{-1}$, \mathbf{T} 为平衡变换矩阵, 作者已在文献[10-12]中给出计算公式。

完成平衡变换后, $\bar{\mathbf{W}}_C$ ($\bar{\mathbf{W}}_O$) 的 Hankel 奇异值矩阵 Σ 可用于确定经验 Gramian 平衡降阶模型的阶数 ℓ 和 Galerkin 投影矩阵 $\mathbf{P}^{[18]}$ 。经验 Gramian 平衡降阶模型可描述为

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}} = \mathbf{P} \mathbf{T} \mathbf{f}(\mathbf{T}^{-1} \mathbf{P}^T \tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{0} = \mathbf{g}(\mathbf{T}^{-1} \mathbf{P}^T \tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{z}, \mathbf{u}) \\ \mathbf{y} = \mathbf{h}(\mathbf{T}^{-1} \mathbf{P}^T \tilde{\mathbf{x}}, \mathbf{z}) \end{cases} \quad (12)$$

式中, \tilde{x} 为经验 Gramian 平衡降阶模型状态量, 其维数远远小于原模型状态量 x 的维数。

2.2 经验 Gramian 平衡降阶的改进

根据样本数据形成有效经验 Gramian 矩阵是经验 Gramian 平衡降阶方法的核心, 对降阶效果有着很大影响。如何结合研究对象特点使样本数据尽可能多地包含非线性模型的动态行为, 形成更加有效的经验 Gramian 矩阵是该方法应用的研究重点。然而在经验 Gramian 矩阵定义中, 只说明通过对非线性模型状态量和控制量施加不同方向扰动的方式进行仿真实验来获取样本数据, 但并未就各方向扰动量 c_m 的取值方法做出详细说明。

在非线性电力系统中, 各类扰动的施加及恢复往往以改变网络结构或负荷相关参数的形式来实现, 如短路故障出现至故障隔离再至重合闸恢复供电、负荷突然增减至恢复等。扰动施加后, 系统在设计的控制器或恒定控制作用下逐渐恢复至稳态。从非线性微分代数方程的角度看, 这是通过改变式(9)中函数作用 f 、 g 、 h 来实现的。但在经验 Gramian 矩阵形成中, 扰动是分别逐一施加在状态量和控制量上的, 与电力系统施加扰动的方法不同。这是由 Gramian 平衡降阶方法考虑降阶模型保持原模型动态行为和输入、输出特性问题所决定的。因此, 无法将电力系统各类扰动的施加方法移植于经验 Gramian 平衡降阶中。

基于上述分析不难看出, 要在电力系统中应用经验 Gramian 平衡降阶方法, 扰动量 c_m 的取值必须考虑电力系统状态量和控制量的变化特点, 否则很难从样本数据中提取出系统输入、输出动态行为变化的特征。因此, 本文针对这一问题结合电力系统特点提出了一种施加扰动的方案。

首先, 结合所研究问题及相关标准, 明确降阶对象各类状态量和控制量的合理变化范围, 使扰动量 c_m 取值符合电力系统基本运行要求。如发电机励磁电压最大最小值, 发电机频率最大最小值以及 ω_{ref} 、 U_{ref} 的变化幅度等。研究问题不同, 扰动量 c_m 取值也会相应的变化。例如, 研究电力系统暂态仿真问题中, 控制量选为 ω_{ref} 、 U_{ref} , 两者在仿真过程中恒定, 则对控制量的扰动值就不宜选的过大; 研究电力系统二级电压控制器设计问题, 控制量选为 U_{ref} , 相比前者, 这里对控制量的扰动值就需稍大一些。

其次, 加入控制器后, 对降阶对象进行各类扰动的仿真, 如各线路发生各类短路故障等。记录各线路在各类故障下各状态量和控制量相对稳态值的正负最大偏移量, 形成各状态量和控制量扰动量 c_m 取值的参考数据。由于无法将电力系统各类扰动的

施加方法移植于经验 Gramian 平衡降阶中, 同时经验 Gramian 平衡降阶模型还需反映出电力系统各类故障下的动态行为, 因此, 采用上述方法一定程度上能够结合电力系统特点丰富样本数据中系统动态信息, 以便取得良好的降阶效果。

再次, 结合所形成的参考数据确定 c_m 取值。考虑到电力系统状态量和控制量的物理意义和变化范围, 以及经验 Gramian 平衡降阶方法正负两方向扰动值相同的特点, c_m 取值叠加至对应状态量或控制量后, 需保证正负两方向的值不超过对应量的变化范围。

值得注意的是, 在对降阶对象各状态量和控制量逐一施加正负方向扰动后所进行的仿真过程中, 由于未加入控制器, 降阶对象一直处于控制量恒定至稳态值的模式, 也就是说降阶对象是在恒定控制作用下由扰动状态逐渐恢复至稳定状态的。由于经验 Gramian 矩阵计算要求降阶对象最终恢复至稳态, 因此, 在扰动仿真过程中, 必须确保降阶对象最终能够恢复至稳态。若降阶对象出现由于某个扰动值选取过大造成无法恢复至稳态的现象, 则需要调整扰动值。

最后, 完成对降阶对象各状态量和控制量逐一施加正负方向扰动仿真后, 需要确定采样时间及采集时长, 以采集仿真数据。从对降阶对象各量扰动开始至降阶对象恢复至稳态可作为一个采集时长。而采样时间须结合研究问题进行选择, 例如, 研究电力系统多机励磁控制器设计问题或电力系统暂态仿真问题, 采样时间宜选取毫秒级, 研究电力系统二级电压控制器设计问题, 采样时间则宜选取秒级。

3 仿真算例

为验证上文所提扰动值 c_m 确定方案可行有效, 本节中选择某实际电网某年规划数据作为仿真分析对象研究, 网内规划发电厂 26 座, 发电机组 62 台, 负荷采用恒功率、恒阻抗模型, 所占比例为 6:4。网架结构如图 1 所示。忽略原动机调速器作用, 机械转矩恒定。降阶对象选择为式(4)一式(6), 加之处理后的式(1)构成, 降阶对象维数为 372。

$$x = [\delta, \omega, E'_q, E'_d, E''_q, E''_d]^T, \quad z = [\theta, U]^T, \quad y = [\delta, U]^T, \\ u = E_f。$$

选择如下方案对降阶对象施加扰动来完成与前文所提方案的对比: 各状态量扰动值 c_m 为所对应初始稳定值的 1%; 该方案在仿真采样过程中, 降阶对象能够维持稳定。图 2 给出了两种方案下降阶对象所对应平衡系统的前 30 个 Hankel 奇异值柱状图, 其他奇异值过小, 未在图中显示。本文所提方案见图 2(a), 对比方案见图 2(b)。

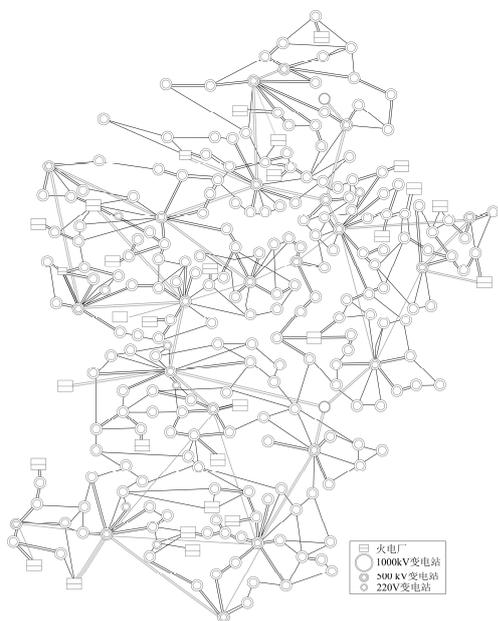


图 1 某实际电网的网架结构

Fig. 1 Grid structure of some relative grid

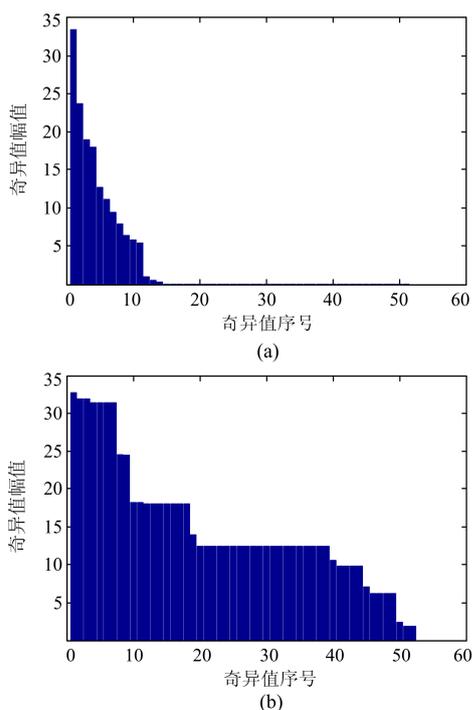


图 2 Hankel 奇异值

Fig. 2 Hankel singular values

相比图 2(b)不难看出, 本文所提方案奇异值衰减明显, 衰减幅度较大, 奇异值分布合理。对比方案中, 奇异值出现了较多相等的区域, 衰减幅度不大, 分布也没有所提方案合理。据统计得: 图 2(a)中, 前 14 个奇异值集合所含能量占总能量的 99.6%, 图 2(b)中, 前 52 个奇异值集合所含能量占总能量的

99.7%, 前 14 个奇异值集合所含能量占总能量的 46.01%。从奇异值分布上看, 取相同的输出误差上界, 本文所提方案降阶程度更大; 在相同降阶阶数下, 本文所提方案降阶效果更好, 下文分析两种方案的降阶效果。

对比场景选择设置: 系统在 0~0.5 s 时间段内正常运行, 在仿真时间 0.5 s 时刻, 线路发生瞬时性三相短路故障。故障线路在 0.55 s 被保护切除, 0.6 s 时刻重合闸成功, 线路恢复正常运行。选择离线路最近发电机的功角、电压曲线进行对比分析。

图 3、图 4 给出了原模型、本文所提方案 14 阶降阶模型、对比方案 52 阶降阶模型在上述场景下的仿真曲线。不难看出, 14 阶和 52 阶降阶模型中发电机的功角、电压等状态量和输出量的动态行为变化趋势与原模型中对应变量的变化趋势基本一致, 且上述降阶模型能够保留原模型的稳定性。相比 52 阶降阶模型, 14 阶降阶模型中发电机的功角、电压等变量与原模型对应变量间的偏差更小。其他状态量及输出量的仿真对比情况与图中相似, 限于文章篇幅, 这里不再给出。也就是说, 14 阶降阶模型的降阶效果在幅值和频域上都优于 52 阶降阶模型, 特别是电压量。

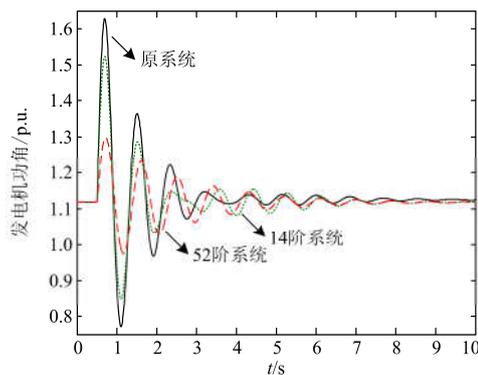


图 3 不同降阶模型的发电机功角仿真曲线对比

Fig. 3 Comparison of generation rotor angle simulated curves with different reduced model

本文所提方案实施后, 系统经验可观可控 Gramian 矩阵包含了更丰富的系统动态行为信息, 降阶模型能够较准确地反映系统的动态行为变化。由于对比方案所形成的系统经验可观可控 Gramian 矩阵包含系统动态行为信息较少, 虽然对比方案中降阶模型的阶数 52 高于本文所提方案的降阶模型阶数 14, 但其降阶效果还是不如本文所提方案。本文所提降阶方案能够在保证误差上界的基础上进一步降低模型阶数, 降阶效果较好。因此, 该方案是可行有效的。

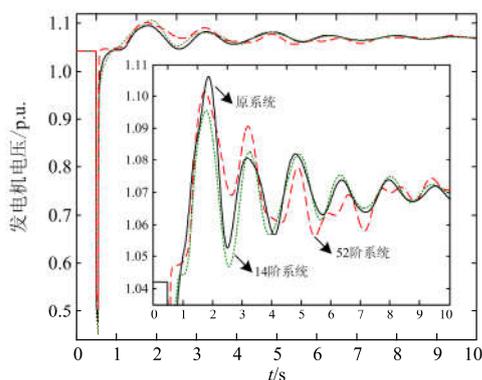


图4 不同降阶模型的发电机电压仿真曲线对比
Fig. 4 Comparison of generation voltage simulated curves with different reduced model

4 结论

本文对电力系统非线性微分代数方程进行经验Gramian平衡降阶研究,建立了系统非线性动态模型,分析了所研究问题与控制量选取及降阶对象之间的关系。为获得更加有效的降阶模型,文中考虑电力系统状态量及控制量变化特点,提出一种方案用于确定各状态量和控制量的扰动值,形成包含丰富系统动态行为信息的经验可观可控Gramian矩阵。仿真验证该方案可行有效。

参考文献

- [1] 张一荻, 管霖. 蚁群算法在发电机动态参数聚合中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 23-27, 33.
ZHANG Yidi, GUAN Lin. Application of ant colony algorithm in generator dynamic parameter aggregation[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 23-27, 33.
- [2] 杜治, 苏宇, 彭昌勇, 等. 基于多层次启发式动态规划算法的电力系统动态等值[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(17): 1-9.
DU Zhi, SU Yu, PENG Changyong, et al. Dynamic equivalent of power system based on global representation heuristic dynamic programming algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(17): 1-9.
- [3] 武艳, 杨数强, 蒋志勋. 基于节点灵敏度分析的大电网等值研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 68-73.
WU Yan, YANG Shuqiang, JIANG Zhixun. Research on the equivalence of large-scale power system using node sensitivity analysis approach[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 68-73.
- [4] 舒进, 都劲松, 王靖程, 等. 基于奇异摄动降阶的风电接入系统阻尼分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(19): 18-25.
SHU Jin, DU Jinsong, WANG Jingcheng, et al. System damping analysis after wind power integration using singular perturbation system reduction[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19): 18-25.
- [5] 王清, 薛安成, 毕天殊, 等. 基于分解降阶模型的双馈异步电机模态估计方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 1-7.
WANG Qing, XUE Ancheng, BI Tianshu, et al. A decomposed-reduced model based modes estimation method of DFIG[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 1-7.
- [6] 李啸骢, 郑涛, 梁志坚, 等. 微分代数模型可控制动电阻与励磁系统多指标非线性控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 43(16): 1-7.
LI Xiaocong, ZHENG Tao, LIANG Zhijian, et al. Multi-index nonlinear control for TCBR and generator excitation based differential algebraic model[J]. Power System Protection and Control, 2016, 43(16): 1-7.
- [7] 黄伟, 庞琳, 曹彬, 等. 基于分区解耦的配电网状态估计的分布式并行计算[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 45-51.
HUANG Wei, PANG Lin, CAO Bin, et al. Parallel and distributed computing for an area-decoupled state estimation method for distribution systems[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 45-51.
- [8] 孔令国, 蔡国伟. 大规模并网光伏电站的逆变器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 57-63.
KONG Lingguo, CAI Guowei. Research on control method of inverters for large-scale grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 57-63.
- [9] 赵洪山, 宋国维, 江全元. 利用平衡理论进行电力系统模型降阶[J]. 电工技术学报, 2010, 25(2): 127-133.
ZHAO Hongshan, SONG Guowei, JIANG Quanyuan. Reduction of power system model using balanced realization method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(2): 127-133.
- [10] 赵洪山, 薛宁, 时宁, 等. 非线性电力系统模型经验Gramian平衡降阶[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(9): 21-26, 40.
ZHAO Hongshan, XUE Ning, SHI Ning, et al. Empirical Gramian balanced reduction of nonlinear power system model[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 21-26, 40.

- [11] ZHAO Hongshan, LAN Xiaoming, XUE Ning, et al. Excitation prediction control of multi-machine power systems using balanced reduced model[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2014, 8(6): 1075-1081.
- [12] 赵洪山, 兰晓明, 周雪青. 基于平衡降阶模型的多机电力系统非线性励磁预测控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(22): 61-67.
ZHAO Hongshan, LAN Xiaoming, ZHOU Xueqing. Nonlinear excitation predictive control of multi-machine power systems based on balanced reduced model[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(22): 61-67.
- [13] 张钢, 杜正春, 倪煜, 等. 基于非线性系统降阶的感应电动机群聚合[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(8): 1893-1899.
ZHANG Gang, DU Zhengchun, NI Yu, et al. Induction motors aggregation based on nonlinear model reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(8): 1893-1899.
- [14] 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: 50-82.
- [15] ZHAO J Q, ZHANG Y J, ZHANG P, 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(1): 9-19.
- [16] 王积伟, 陆一心, 吴振顺. 现代控制理论与工程[M]. 北京: 高等教育出版社, 2002: 50-82.
- [17] MOORE B C. Principal component analysis in linear systems: controllability observability and model reduction[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1981, 26(1): 17-32.
- [18] BAUR U, BENNER P, FENG L H. Model order reduction for linear and nonlinear systems: a system-theoretic perspective[J]. Archives Computational Methods in Engineering, 2014, 21(4): 331-3358.

收稿日期: 2016-10-21; 修回日期: 2016-11-30

作者简介:

赵洪山(1965-), 男, 教授, 研究方向为电力系统混杂建模、动态分析与控制以及电力系统优化计算等; E-mail: zhaohshen@126.com

兰晓明(1987-), 男, 通信作者, 博士研究生, 研究方向为电力系统动态模型以及非线性预测控制算法; E-mail: ncepu_lxm10@163.com

米增强(1960-), 男, 博士生导师, 教授, 研究方向为风电场建模与接入系统分析、风电场监控系统、风电场发电功率预测等。E-mail: mizengqiang@sina.com

(编辑 葛艳娜)