

光伏系统模型的多时间尺度降阶

代海建¹, 吴兴全¹, 李志伟¹, 瞿继平¹, 周一辰²

(1.中国能源建设集团甘肃省电力设计院有限公司,甘肃兰州 730000;2.华北电力大学电气与电子工程学院,河北保定 071000)

摘要:为了解决光伏接入的电力系统模型复杂和分析困难的问题,提出了一种简单实用的光伏发电系统模型降阶方法。综合考虑主电路及控制策略建立了光伏发电系统小信号模型,分解模型中的多时间尺度特性以确定快速状态和慢速状态,并用相对速度估计法验证了快慢状态分解的正确性,避免了由摄动参数选取不当引起的降阶前后系统稳定性不一致的问题。通过忽略快动态变量对原模型进行降阶,添加校正项得到了零阶近似模型和一阶近似模型。最后在MATLAB中分别对比了降阶模型、校正模型与详细模型的动态响应和计算误差。研究表明,降阶模型和校正模型均能够正确反映详细模型在小扰动下的动态响应,且在提高计算速度、简化分析过程方面有明显优势。

关键词:电力系统及其自动化;奇异摄动理论;多时间尺度分解;相对速度估计;零阶近似;一阶近似

中图分类号:TM711 **文献标志码:**A

Multi-time scale reduction of photovoltaic system models

DAI Haijian¹, WU Xingquan¹, LI Zhiwei¹, QU Jiping¹, ZHOU Yichen²

(1.China Energy Construction Group Gansu Electric Power Design Institute Company Limited, Lanzhou, Gansu 730000, China; 2. Department of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding, Hebei 071000, China)

Abstract: In order to solve the model complexity and analysis difficulty of electric system joined up by photovoltaic power system, a simple and practical model reduction method of photovoltaic power system is proposed. Considering the main circuit and control strategy, a small signal model of photovoltaic power generation system is established. On this basis, the multi-time scale characteristics of the system model are decomposed to determine the fast and slow states. The correctness of the fast and slow states decomposition is verified by the relative velocity estimation method, which avoids the inconsistency of the stability of the system before and after the reduction caused by the improper selection of perturbation parameters. By ignoring the fast dynamic factors, the order of the model is reduced, and the zero-order approximation model and the first-order approximation model are obtained by adding correction terms. Finally, the dynamic responses and calculation errors of the reduced order model, the corrected model and the original model are compared in MATLAB. The results show that the reduced model and the correction model can correctly reflect the dynamic response of the detailed model under small perturbations, and have obvious

收稿日期:2018-11-21;修回日期:2019-03-08;责任编辑:李 穆

基金项目:河北省自然科学基金(E2017502053)

第一作者简介:代海建(1989—),男,河北保定人,工程师,主要从事电力系统分析方面的研究。

通信作者:周一辰博士。E-mail:zhou.yi.chen.1990@163.com

代海建,吴兴全,李志伟,等.光伏系统模型的多时间尺度降阶[J].河北科技大学学报,2019,40(2):167-174.

DAI Haijian, WU Xingquan, LI Zhiwei, et al. Multi-time scale reduction of photovoltaic system models[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2019, 40(2): 167-174.

advantages in improving the calculation speed and simplifying the analysis process.

Keywords: power system and automation; singular perturbation theory; multi-time scale order reduction; relative velocity estimation; zeroth approximation; first approximation

近年来,光伏发电以其清洁、可再生、资源充足等优势,在世界范围内获得了高度关注。光伏发电系统渗透率日益增高为电力系统带来了新的挑战。由于光伏系统含有不同时间常数的变量,有些变量具有快变特征,而有些变量则具有慢变特征,其本质上是一个集多个时间尺度为一体的系统,若基于系统完整的数学模型对其进行计算和分析,容易引起“维数灾”问题^[1]。因此,对光伏系统模型进行化简具有十分重要的意义。

当前光伏系统模型的化简方法主要有2类:从功能等效的角度进行等效简化或采用外特性行为的理想受控源或电流源模型,如文献[2]将光伏系统的直流部分和交流部分分别等效简化为最大出力计算模型和受控电压源及控制模块;文献[3]提出了前馈解耦控制下考虑电池 $U-I$ 外特性和逆变控制系统动特性的光伏发电系统降阶模型;文献[4]提出可控充电阶段电压外环采用比例控制器可实现等效模型降阶。虽然上述简化模型能够降低系统建模时的工作量与仿真过程中的计算量,但是存在外特性行为模型无法描述系统内部因果关系^[5]以及模型过于简化而降低仿真精度的问题。而数学模型降阶通过保留影响系统动态特性的主要因素、忽略次要因素,以低阶数学模型来代替原高阶数学模型进行系统分析,从而简化分析过程、提高计算效率^[6],既能够保留系统的动态特性,又可以根据计算需求适当提高模型精度。

奇异摄动降阶是数学模型降阶的有效方法之一,在电气工程的多个领域中均有应用,这为光伏系统模型简化提供了参考。刘永强等^[7-8]首次建立了三时间尺度的电力系统奇异摄动模型,给出了忽略快动态和固定慢动态的降阶条件,并对纯交流系统进行了降阶研究,但未应用到交直流系统中,这一不足在文献[1]和[9]中得到了补充;文献[10]利用平衡理论对电力系统中单机无穷大系统进行了模型降阶研究;文献[11]利用奇异摄动理论对包含电压源型逆变器的微网模型进行了降阶模型的研究;文献[12]根据奇异摄动理论提出了微网中基于下垂控制的 IIDG 模型简化方法,并利用系统稳定域边界二次近似方法证明了 IIDG 模型降阶前后的暂态稳定一致性。

近年来,国内外学者逐渐将奇异摄动理论应用到了快速发展的电力电子技术和大规模接入的可再生能源发电系统,其中新能源发电系统方面的研究对象多为风电系统,而针对光伏系统的研究较少。文献[13-14]对不同风力发电系统的降阶模型进行了研究;文献[15]将奇异摄动动态降阶与特征值分析相结合,直观、有效地分析了风电机组接入对同步机主系统低频振荡的影响;文献[16]基于奇异摄动理论分析了电力电子接口电源内部的精细时间尺度结构,建立了降阶模型并分析了其暂态稳定性;文献[17]采用奇异摄动方法简化了新能源系统控制策略的设计,提出了一种改进型频率调节模型,解决了现有频率调节方法无法实现对频率有效调节的问题。然而上述研究均未计算使降阶条件成立的奇异摄动参数范围,因为在实际系统中,摄动参数不总是满足充分小的条件,其取值会对降阶前后系统的稳定性产生影响,因此产生了一个重要研究问题——摄动参数范围问题。文献[1]给出了一种奇异摄动参数范围的计算方法,能够解决奇异摄动参数穿越的问题,但此方法需要计算系统矩阵的 Kronecker 和,增加了矩阵维度,降低了计算效率,故而实用性不强。

为解决这一问题,本文提出了一种基于奇异摄动理论的光伏系统模型降阶方法。首先,将光伏系统非线性的原始模型线性化,转化为奇异摄动形式;然后,通过分解系统的多时间尺度特性和忽略快动态因子来获得降阶系统,并用相对速度估计法验证了快慢子系统分解的正确性,无需计算奇异摄动参数的范围,不仅能避免降阶前后系统稳定性不一致的问题,而且能够提高计算速度;最后在降阶系统中加入摄动参数相应的修正项,得到降阶模型的零阶近似和一阶近似,提高了降阶系统的精度。

1 奇异摄动理论及相对速度估计

1.1 奇异摄动理论

奇异摄动降阶思想是首先忽略快变量以降低系统阶数,然后引入边界层校正来提高近似程度,将系统分解为慢系统和边界层系统来近似原系统的动力学行为^[18]。假设一个系统可由下面的奇异摄动形式描述:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \epsilon \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} u, \quad (1)$$

其中, ϵ 的值很小且大于零, 矩阵 \mathbf{A}_{22} 非奇异。

当 $\epsilon \rightarrow 0$ 时, 令 $\epsilon = 0$, 式(1)可转化为

$$\begin{cases} \dot{X}_0 = A_{11}X_0 + A_{12}Z_0 + B_1u, \\ 0 = A_{21}X_0 + A_{22}Z_0 + B_2u, \end{cases} \quad (2)$$

方程(2)称为方程(1)的退化问题。解得:

$$Z_0 = -A_{22}^{-1}A_{21}X_0 - A_{22}^{-1}B_2u, \quad (3)$$

将 z 的解代入方程(2), 得到忽略快动态的降阶子系统:

$$\dot{X}_0 = A_R X_0 + B_R u, \quad (4)$$

其中, $x_0(0) = x^0$, $A_R = A_{11} - A_{12}A_{22}^{-1}A_{21}$, $B_R = B_1 - A_{12}A_{22}^{-1}B_2$ 。

边界层校正项只在边界层内起作用, 而在远离边界的外部区域, 它的影响将消失。下面进行边界层的修正, (x, z) 的零阶近似由式(5)给出:

$$\begin{cases} x(t) = X_0(t) + o(\epsilon), \\ z(t) = Z_0(t) + q_0(\tau) + o(\epsilon), \end{cases} \quad (5)$$

q_0 由下面一组微分方程得到:

$$\frac{dq_0}{d\tau} = [A_{22}]q_0 \quad (6)$$

其中, $q_0(0) = z^0 - Z_0(0)$, $\tau = t/\epsilon$ 。

(x, z) 的一阶近似由式(7)给出:

$$\begin{cases} x(t) = X_0(t) + \epsilon[X_1(t) + p_0(\tau)] + o(\epsilon^2), \\ z(t) = Z_0(t) + q_0(t) + \epsilon[Z_1(t) + q_1(\tau)] + o(\epsilon^2), \end{cases} \quad (7)$$

其中, (x_1, z_1) 和 (p_0, q_1) 由下列方程得到:

$$\frac{dp_0}{d\tau} = [A_{12}]q_0, \quad (8)$$

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = [A_R]X_1 + [A_{12}A_{22}^{-1}]\dot{Z}_0, \\ Z_1 = [A_{22}^{-1}]\dot{Z}_0 - [A_{12}A_{22}^{-1}]X_1, \end{cases} \quad (9)$$

$$\frac{dq_1}{d\tau} = [A_{21}]p_0 + [A_{22}]q_1, \quad (10)$$

其中, $p_0(\infty) = 0$ 。

1.2 相对速度估计

系统模型降阶的基本要求是降阶前后系统的稳定性保持一致, 根据控制理论, 通过分析系数矩阵的特征值, 可以得到该系统在静态工作点附近的稳定性、振荡频率等大量信息^[19]。若系数矩阵所有特征值均具有负实部, 表示系统在该运行点是小于扰稳定的; 反之, 系统是不稳定的。特征值的实部还表征了系统模式的发散速度, 据此可以判断快慢状态分解的正确性, 具体步骤如下:

1) 根据上述奇异摄动降阶理论分解出快慢子系统, 得到系数矩阵 \mathbf{A}_R 和 \mathbf{A}_{22}/ϵ ;

2) 计算矩阵 \mathbf{A}_R 和 \mathbf{A}_{22}/ϵ 的特征值, 判断降阶前后系统的稳定性是否一致, 若一致, 进行第 3 步; 若不一致, 则表明快慢状态量的分解不正确;

3) 令 $\sigma_j = \text{Re}(\Omega_j)$, $\alpha_i = \text{Re}(\lambda_i)$, 其中, Ω_j 是 \mathbf{A}_{22}/ϵ 的特征值, λ_i 是 \mathbf{A}_R 的特征值, 若有 $\min. |\sigma_j| \gg \max. |\alpha_i|$, 则说明快变子系统的变化速度远大于慢变子系统, 即分解是正确的。

此方法不需要计算摄动参数的范围, 便能判断快慢状态分解的正确性, 节省了计算时间, 避免了摄动参数取值不当造成的降阶前后系统稳定性不一致的问题。

2 光伏系统小信号模型

本文的研究对象为两级三相式光伏发电系统, 其基本结构图如图 1 所示。

光伏系统模型可分为直流和交流两部分。直流部分包含光伏阵列、DC/DC Boost 变换器及其控制和逆变器直流侧电容, 主要通过改变 DC/DC Boost 变换器的占空比实现最大功率点跟踪; 光伏系统的交流部分

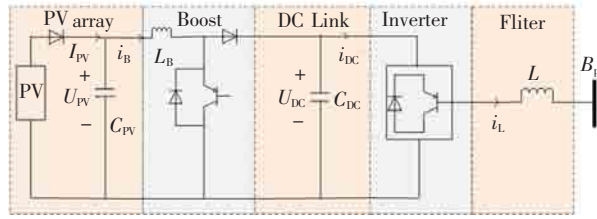


图 1 两级三相式光伏发电系统结构图

Fig.1 Two-stage three-phase photovoltaic power generation system structure diagram

包含逆变器及其双环控制、滤波器和锁相环,主要通过逆变器双环控制实现光伏并网点电压恒定和逆变器直流侧电压恒定。

将奇异摄动降阶理论应用于系统模型的关键步骤在于用式(1)的奇异摄动形式来描述系统原模型,因此非线性的光伏系统模型需要做线性化处理,各子模块的数学模型及线性化模型如表 1 所示。

表 1 各子模块的数学模型及线性化模型

Tab.1 Mathematical model and linearization model of each submodule

模块名称	原模型	线性化模型
光伏阵列	$i_{PV} = n_p I_{SC} [1 - C_1 (\exp(\frac{u_{PV}}{n_s C_2 U_{OC}}) - 1)]$	$\Delta i_{PV} = K_A \Delta u_{PV}$
直流部分	Boost $C_{PV} \dot{u}_{PV} = i_{PV} - i_B$ $L_B \dot{i}_B = u_{PV} - D u_{DC}$	$\Delta \dot{u}_{PV} = (\Delta i_{PV} - \Delta i_B) / C_{PV}$ $\Delta i_B = (\Delta u_{PV} - D' \Delta u_{DC} - u_{DC0} \Delta D') / L_B$
	MPPT $\dot{D}'_u = (u_{PVref} - u_{PV}) \cdot K_{i1}$ $\tau \dot{D} = (u_{PVref} - u_{PV}) \cdot K_{p1} + D'_u - D'$	$\Delta \dot{D}'_u = -K_{i1} \Delta u_{PV}$ $\Delta \dot{D} = (-K_{p1} \Delta u_{PV} + \Delta D'_u - \Delta D') / \tau$
	DC 链路 $C_{DC} \frac{du_{DC}}{dt} = D' i_B - i_{DC}$	$\Delta \dot{u}_{DC} = (D'_0 \Delta i_B + i_{B0} \Delta D' - \Delta i_{DC}) / C_{DC}$
交流部分	滤波器 $L \dot{i}_d = L \omega i_q + u_{td} - u_d$ $L \dot{i}_q = -L \omega i_d + u_{tq} - u_q$	$L \Delta \dot{i}_q = K_{p2} (\Delta i_{qref} - \Delta i_q) + \Delta u_{tq}$ $L \Delta \dot{i}_d = K_{p2} (\Delta i_{dref} - \Delta i_d) + \Delta u_{td}$
	锁相环 $\dot{x}_{pLL} = -u_d$ $\dot{\theta}_{pLL} = -K_{p4} u_d + K_{i4} x_{pLL}$	$\Delta \dot{x}_{pLL} = -\Delta u_d$ $\Delta \dot{\theta}_{pLL} = -K_{p4} \Delta u_d + K_{i4} \Delta x_{pLL}$
	电流内环控制 $\dot{i}_{id} = K_{i2} (i_{dref} - i_d)$ $\dot{i}_{iq} = K_{i2} (i_{qref} - i_q)$	$\Delta \dot{i}_{iq} = K_{i2} (\Delta i_{qref} - \Delta i_q)$ $\Delta \dot{i}_{id} = K_{i2} (\Delta i_{dref} - \Delta i_d)$
	电压外环控制 $\dot{i}_{qv} = K_{i3} (U_{DCref} - U_{DC})$ $i_{qref} = i_{qv} + K_{p3} (U_{DCref} - U_{DC})$	$\Delta \dot{i}_{qv} = -K_{i3} \Delta u_{DC}$ $\Delta i_{qref} = -K_{i3} \Delta u_{DC} + \Delta i_{qv}$

在表 1 中,

$$K_A = -n_p I_{SC} C_1 \exp\left(\frac{u_{PV0}}{n_s C_2 U_{OC}}\right) / (n_s C_2 U_{OC}),$$

$$C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{SC}}\right) \exp\left(-\frac{U_m}{C_2 U_{OC}}\right),$$

$$C_2 = \left(\frac{U_m}{U_{OC}} - 1\right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{SC}}\right)\right]^{-1},$$

其中, I_m, I_{SC}, U_m 和 U_{OC} 分别为最大功率点电流、短路电流、最大功率点电压和 PV 阵列的开路电压。

整理线性化结果后得到:

$$\dot{y} = Ay + Bu,$$

其中,

$$u = [\Delta u_q, \Delta u_d]^T,$$

$$y = [\Delta u_{PV}, \Delta i_B, \Delta u_{DC}, \Delta D'_u, \Delta D', \Delta u_{iq}, \Delta u_{id}, \Delta i_{qv}, \Delta x_{pLL}, \Delta \theta_{pLL}, \Delta i_q, \Delta i_d]^T$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & \frac{i_{q0}}{u_{DC0}C_{DC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{i_{d0}}{u_{DC0}C_{DC}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & K_{p4} & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$A = \begin{bmatrix} \frac{K_A}{C_{PV}} & -\frac{1}{C_{PV}} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1}{L_B} & 0 & -\frac{D'_0}{L_B} & 0 & -\frac{U_{DC0}}{L_B} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{D'_0}{C_{DC}} & -\frac{K_{p2}K_{p3}i_{q0}}{U_{DC0}C_{DC}} & 0 & \frac{I_{B0}}{C_{DC}} & -\frac{i_{q0}}{U_{DC0}C_{DC}} & -\frac{i_{d0}}{U_{DC0}C_{DC}} & -\frac{i_{q0}}{U_{DC0}C_{DC}} & 0 & 0 & a & b \\ -K_{i1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{K_{p1}}{\tau} & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\tau} & -\frac{1}{\tau} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -K_{i2}K_{i3} & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{i2} & 0 & 0 & -K_{i2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -K_{i2} \\ 0 & 0 & -K_{i3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & K_{i4} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{K_{p2}K_{p3}}{L} & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & \frac{K_{p2}}{L} & 0 & 0 & -\frac{K_{p2}}{L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{L} & 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{K_{p2}}{L} \end{bmatrix}$$

在矩阵 A 中, $a = -\frac{u_{iq0} - \omega L i_{d0} - K_{p2} i_{q0}}{C_{DC} u_{DC0}}, b = -\frac{u_{id0} + \omega L i_{q0} - K_{p2} i_{d0}}{C_{DC} u_{DC0}}$ 。

3 降阶结果

3.1 多时间尺度分解

如表 2 所示,在光伏系统详细模型的微分方程中,存在不同的时间尺度,从数量级上比较,Boost 升压电路方程里的小参数 $C_{PV} = 0.05$ 和逆变器电路方程里的电感 $L = 0.1$ p.u. 远小于 $L_B = 100$ p.u. 和 $C_{DC} = 100$ p.u., 由此确定需要降阶的快状态变量为 u_{PV} 和 i_d, i_q 。

因此在第一阶忽略快动态的降阶中, y 被划分为慢变量 x 和快变量 z :

$$x = [\Delta i_B, \Delta u_{DC}, \Delta D'_u, \Delta D', \Delta u_{iq}, \Delta i_{id}, \Delta i_{qv}, \Delta x_{pLL}, \Delta \theta_{pLL}, \Delta i_q, \Delta i_d]^T,$$

$$z = [u_{PV}]^T.$$

第二次降阶, y 被划分为慢变量 x 和快变量 z :

$$x = [\Delta i_B, \Delta u_{DC}, \Delta D'_u, \Delta D', \Delta u_{iq}, \Delta u_{id}, \Delta i_{qv}, \Delta x_{pLL}, \Delta \theta_{pLL}]^T,$$

$$z = [i_q \quad i_d]^T.$$

3.2 相对速度估计

依据表 2 的系统参数,计算原模型与降阶模型系数矩阵所有的特征值,如表 3 所示。不难发现,所有特征值均位于复平面的左半平面,即降阶前后系统都是小干扰稳定的。表 4 为两次快慢变量分解的验证结果,表中数值表明快速子系统比慢速子系统分别快 5.46 和 1.28 倍,且快子系统均不构成刚性方程。因此,系统变量的划分正确,可以进行下一步的降阶。

表 2 系统参数

Tab.2 System parameters

参数	取值	参数	取值
U_{OC}/V	33.4	$C_{PV}/p.u.$	0.05
U_m/V	26.2	$C_{DC}/p.u.$	100
I_{SC}/A	8.12	$L_B/p.u.$	100
I_m/A	7.68	$L/p.u.$	0.1
K_{i1}	0.001	K_{i3}	-3
K_{p1}	0.000 000 1	K_{p3}	-1
K_{i2}	1	K_{i4}	1
K_{p2}	0.01	K_{p4}	1

表 3 降阶顺序

Tab.3 Reduced order

序号	状态变量	参数取值
1	U_{PV}	$C_{PV} = 0.05$ p.u.
2	i_q, i_d	$L = 0.1$ p.u.

表4 原模型与降阶模型的特征值分布

Tab.4 Eigenvalue distribution of original model and reduced order model

模型	序号	取值	序号	取值	序号	取值
原模型	1	-100	4	-9.84	9	-5.466×10^{-4}
	2	-27.29	5,6	$-0.08 \pm 0.40i$	10	-4.027×10^{-5}
	3	-9.99	7,8	-0.01	11,12	-0
降阶模型 I	1	-100	4,5	$-0.08 \pm 0.40i$	9	-8.6×10^{-6}
	2	-9.99	6,7	-0.01	10,11	-0
	3	-9.84	8	-0.0026		-0
降阶模型 II	2,3	$-0.08 \pm 0.40i$	6	-0.0026	8,9	-0

4 仿真及分析

在用微分方程描述的一个变化过程中,若包含着多个相互作用但变化速度相差十分悬殊的子过程,这样一类过程就认为具有“刚性”,在分析计算中很难兼顾不同时间尺度的子过程,因此仿真分析时

需要选取很小的步长,这大大降低了计算效率。但由于快慢状态分解后得到的子系统与原系统相比不是刚性的,所以在仿真中可以采用较大的步长^[20]。文献[20]提出了一种经验法则:仿真允许的步长取决于特征值的最大值的倒数,故取原系统和降阶系统的仿真步长各取为 0.001 s 和 0.01 s。

4.1 模型精度分析

以原模型 U_{PV} 和 i_q 的响应曲线作为参考,故障设置为在 0.1 s 时,故障持续时间为 0.02 s。在 Matlab 中仿真得到降阶模型与原模型 U_{PV} 和 i_q 的响应曲线。如图 2 和图 3 所示,两条曲线趋势基本一致,误差在 0.000 1 V 和 0.01 A 以内。因此,在小扰动下,降阶模型与完整模型具有基本一致的响应。

表5 相对速度估计结果

Tab.5 Results of the estimated relative speed

序号	相对速度
1	5.46
2	1.28

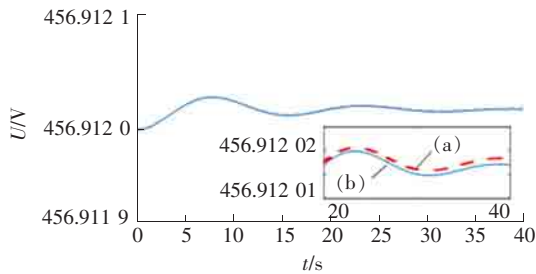


图2 降阶前后的 U_{PV} 响应曲线

Fig.2 Response of U_{PV} before and after reduction

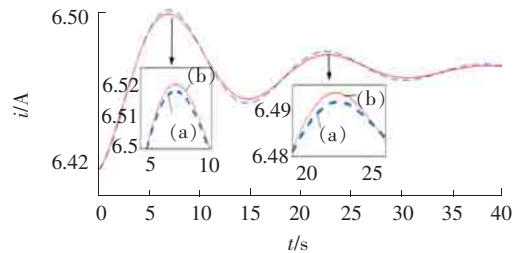


图3 降阶前后的 i_q 响应曲线

Fig.3 Response of i_q before and after reduction

以 i_q 为例,图 4 显示了不同模型响应的响应曲线,其中 $i_q, i_{q02}, i_{q\ zero}, i_{q\ first}$ 分别表示原模型、降阶模型、零阶近似和一阶近似模型的响应曲线。表 6 对比了降阶模型、改进模型与原模型的相对误差。结合图 4 和表 6 可以看出,降阶模型与原始模型的响应基本一致,而改进模型的响应更为精确。

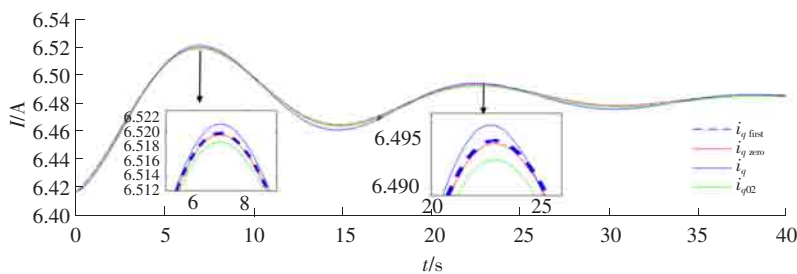


图4 原始模型、降阶模型及改进模型相应的 i_q 响应曲线

Fig.4 Response of i_q for the origin model, the reduction model and the improved model

4.2 计算速度分析

本节采用表 7 的仿真用时来反映计算速度,用时越短表明计算速度越快。不难看出,降阶模型在减少仿真用时方面有着明显的优势,其仿真用时约为原模型的 18.4%和 21.3%。;校正模型的计算速度虽然较慢于降阶模型,但仍远优于原模型,其仿真用时约为原模型的 22.9%和 59.2%。

表 6 各模型的相对误差对比

Tab.6 Relative error comparison of each model

类型	相对误差/%
降阶模型 1	0.086
降阶模型 2	0.092
校正模型 1	0.072
校正模型 2	0.007

表 7 各模型仿真用时对比

Tab.7 Simulation time of each system

类型	仿真用时/s	相对用时/%
原模型	1.915	100
降阶模型 1	0.353	18.4
降阶模型 2	0.407	21.3
校正模型 1	0.438	22.9
校正模型 2	1.133	59.2

5 结 论

1)建立了两级三相式光伏发电系统的详细模型,根据奇异摄动理论提取该模型多时间尺度的奇异摄动参数,通过忽略快动态因子得到降阶模型,并利用相对速度估计法验证了快慢子系统分解的正确性,无需计算摄动参数的范围,缩短了计算时间,避免了因摄动参数选取不当而引起的降阶前后系统稳定性不一致的问题。

2)对降阶模型进行了修正,得到零阶近似模型和一阶近似模型。仿真结果表明,降阶模型和校正模型的响应与原模型基本一致,且能够提高计算效率。在精度和计算速度方面,降阶模型和校正模型有着各自的优势,前者计算速度更快,后者则更加精确。在实际应用中,可以综合精度和计算速度的要求来选取不同的模型。

参考文献/References:

- [1] 马凡,马伟明,付立军.一种多时间尺度降阶原则及其在交直流电力系统中的应用[J].中国电机工程学报,2009,29(13):41-47.
MA Fan, MA Weiming, FU Lijun. A multi-time scale reduction principle and its application in AC/DC power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(13): 41-47.
- [2] 刘兴杰,郭栋.光伏发电系统等效简化模型研究[J].太阳能学报,2016,37(3):759-764.
LIU Xingjie, GUO Dong. Research on equivalent simplified model of photovoltaic power generation system[J]. Journal of Solar Energy, 2016, 37(3): 759-764.
- [3] 李培强,胡泽,李欣然,等.直流逆变分布式电源降阶模型及小扰动稳定分析[J].湖南大学学报(自然科学版),2016,43(4):98-104.
LI Peiqiang, HU Ze, LI Xinran, et al. The small signal stability analysis of the grid connected DC distributed generation with reduced order model[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2016, 43(4): 98-104.
- [4] 田艳军,魏石磊,王毅,等.光伏直流升压汇集系统的模型降阶启动控制策略[J].电力建设,2018,39(11):77-84
TIAN Yanjun, WEI Shilei, WANG Yi, et al. Order-reduced startup strategy for boosting and collecting of photovoltaic system[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(11): 77-84.
- [5] ORTEGA A, MILANO F. Generalized model of VSC-based energy storage systems for transient stability analysis [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3369-3380.
- [6] 康军,马凡,胡健,等.一种多时间尺度线性系统模型降阶的误差预测方法[J].电工技术学报,2017,32(3):56-64.
KANG Jun, MA Fan, HU Jian, et al. An error prediction method for multi-time scale linear system model reduction[J]. Transactions of Electrical Engineering, 2017, 32(3): 56-64.
- [7] 刘永强,严正,倪以信,等.双时间尺度电力系统动态模型降阶研究(一):电力系统奇异摄动模型[J].电力系统自动化,2002,26(18):1-5.
LIU Yongqiang, YAN Zheng, NI Yixin, et al. Study on the order reduction of two-time scale power system dynamic models(Part one): Power system singular perturbation model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(18): 1-5.
- [8] 刘永强,严正,倪以信,等.双时间尺度电力系统动态模型降阶研究(二):系统降阶与分析[J].电力系统自动化,2002,26(19):1-6.
LIU Yongqiang, YAN Zheng, NI Yixin, et al. Study on the order reduction of two-time scale power system dynamic models(Part two): Order reduction and analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(19): 1-6.

- [9] 马凡,马伟明,付立军,等.一种非线性多时间尺度系统模型降阶方法[J].中国电机工程学报,2013,33(16):162-170.
MA Fan, MA Weiming, FU Lijun, et al. A model order reduction method for nonlinear multi-time scale systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16):162-170.
- [10] 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.
- [11] RASHEDUZZAMAN M, MUELLER J A, KIMBALL J W. Reduced-order small-signal model of microgrid systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(4):1292-1305.
- [12] 孟潇潇,周念成,王强钢.逆变型分布式电源模型的多时间尺度降阶分析及稳定一致性证明[J].中国电机工程学报,2018,38(13):3813-3825.
MENG Xiaoxiao, ZHOU Niancheng, WANG Qianggang. Multi-time scale model order reduction and stability consistency of IIDG system [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(13): 3813-3825.
- [13] PULGAR-PAINEMAL H A, SAUER P W. Towards a wind farm reduced order model [J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(8): 1688-1695.
- [14] 蔺红,晁勤.直驱永磁同步风力发电系统的降阶模型研究[J].电网技术,2012,36(8):145-151.
LIN Hong, CHAO Qin. Analysis and research on reduced model of direct-drive permanent magnet wind power generation system[J]. Power System Technology, 2012, 36(8):145-151.
- [15] 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. Damping analysis of wind power access system based on singular perturbation reduction [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(19):18-25.
- [16] 叶一达,魏林君,阮佳阳,等.电力电子接口电源的准功率特性降阶建模体系[J].中国电机工程学报,2017,37(14):3993-4001.
YE Yida, WEI Linjun, RUAN Jiayang, et al. A generic reduced-order modeling hierarchy for power-electronic interfaced generators with the quasi-constant-power feature[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14):3993-4001.
- [17] 郭磊,刘健,郑少明,等.一种考虑新能源的改进型电网频率校正控制方法及其建模[J].电力系统保护与控制,2012,40(22):78-82.
GUO Lei, LIU Jian, ZHENG Shaoming, et al. An advanced modeling and control approach for frequency regulation in electric energy systems with new resources[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(22): 78-82.
- [18] 孟博,井元伟,刘晓平.非线性奇异摄动系统的反馈镇定[J].东北大学学报(自然科学版),2009,30(1):5-8.
MENG Bo, JING Yuanwei, LIU Xiaoping. Feedback stabilization of nonlinear singularly perturbed systems[J]. Journal of Northeastern University(Natural Science), 2009, 30(1):5-8.
- [19] 周凤岐,周军,郭建国.现代控制理论基础[M].西安:西北工业大学出版社,2011.
- [20] PAI M A, ADGAONKAR R P. Dynamic equivalents of power systems using singular perturbation technique[J]. IFAC Proceedings Volumes, 1979, 5(12):33-40.