

电力系统动态仿真中模型参数不确定性的定量分析

陈建华, 吴文传, 张伯明, 伍双喜

(电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室(清华大学电机系), 北京市 海淀区 100084)

Quantitative Evaluation of Parameter Uncertainty in Power System Dynamic Simulation

CHEN Jianhua, WU Wenchuan, ZHANG Boming, WU Shuangxi

(State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments

(Department of Electrical Engineering, Tsinghua University), Haidian District, Beijing 100084, China)

ABSTRACT: Confidence level of power system dynamic simulation results is affected due to the parameter uncertainty existing in the models for the simulation. In the research on parameter uncertainty, both simulation times and calculation amounts by traditional evaluation methods based on Monte Carlo analysis are not satisfied, and the quantitative expression of the influence of parameter uncertainty cannot be given by trajectory sensitivity, thus an approach combining trajectory sensitivity with probabilistic collocation is proposed to quantitatively analyze the influence of parameter uncertainty on dynamic simulation results. Results of dynamic simulation of a 4-machine 2-area system show that the proposed approach not only can rapidly analyze dominant parameters that greatly influence simulation result, but also can directly output a polynomial relation with the most suitable order that is built between dominant parameters and the response to quantitatively analyze the uncertainty of parameters. Thus, the proposed method can clearly quantize the relation between parameter uncertainty and system stability of power system.

KEY WORDS: trajectory sensitivity; probabilistic collocation method; power system dynamic simulation; parameter uncertainty

摘要: 由于电力系统动态仿真模型中负荷参数存在不确定性, 这使仿真结果的可信度受到影响。在研究负荷参数不确定时, 采用传统蒙特卡罗分析法仿真次数过多、仿真时间过长, 而采用轨迹灵敏度法又不能给出参数不确定性影响的定量表示。因此采用了一种将轨迹灵敏度法与概率分配法相结合的方法, 定量分析负荷参数的不确定性对动态仿真结果的影响。在4机2区域系统上的仿真结果表明, 该方法不仅能够快速分析对仿真结果影响较大的主导参数, 而且能够直接

输出响应与主导参数之间建立的最合适阶次的多项式关系, 定量分析参数的不确定性。因此文中方法能够快速清晰地量化出主导参数的不确定性与系统稳定度之间的关系。

关键词: 轨迹灵敏度; 概率分配法; 电力系统动态仿真; 参数不确定性

0 引言

电力系统的时域仿真结果是电力系统规划、设计和运行的重要依据。仿真中使用的模型通常是对实际系统的近似描述, 各模型特别是电力系统动态元件—负荷参数的不确定性会对系统的动态仿真造成很大的影响, 使用不正确的参数甚至可能产生与实际相反的仿真结果, 影响系统稳定性的判断^[1-3]。因此量化模型参数不确定性对仿真结果的影响, 对电力系统动态仿真及稳定分析有着重要的理论和工程价值。

不确定性建模及其分析方法已广泛应用于电力系统可靠性分析、电力市场、安全分析等方面^[4-8]。在分析电力系统动态仿真的参数不确定性时, 通常采用蒙特卡罗模拟法。由于蒙特卡罗模拟法需要随机进行海量仿真才可能得到较为可信的结果, 因此限制了其在大电网中的应用。轨迹灵敏度法是目前分析参数不确定性影响的一种有效方法^[9-17]。它可以获得参数的不确定性对动态仿真结果影响的相对大小, 但不能给出绝对量化表示。为兼顾两者优点, 本文采用轨迹灵敏度法与概率分配法(probabilistic collocation method, PCM)^[18]相结合的方法来分析参数不确定性的影响。该方法只需少量的仿真便可定量地刻画出负荷参数的不确定性对系统稳定的影响, 克服了蒙特卡罗法仿真次数过

基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(973项目)(2004CB217904); 国家电网公司科技项目(20092001510)。

The National Basic Research Program of China (973 Program)(2004CB217904); Project Supported by Science and Technology of SGCC (20092001510).

大、仿真时间过长的缺点，而且能够给出参数不确定性对仿真结果影响的定量关系。

1 轨迹灵敏度法的基本思想

轨迹灵敏度法描述了由于基础参数或者初始条件改变导致的系统运动轨迹变化的线性化关系。描述电力系统动态过程的微分代数方程(differential algebraic equation, DAE)模型如下

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x, y, \lambda) \\ 0 = g(x, y, \lambda) \end{cases} \quad (1)$$

式中： x 、 y 分别表示状态变量与代数变量； λ 为模型参数，如负荷的正序电抗等。

x 、 y 可以分别表示为

$$\begin{cases} x(t) = \phi(x_0, t, \lambda) \\ y(t) = \varphi(x_0, t, \lambda) \end{cases} \quad (2)$$

设系统的初始条件为

$$\begin{aligned} \phi(x_0, 0, \lambda) &= x_0 \\ g(x_0, \varphi(x_0, 0, \lambda), \lambda) &= 0 \end{aligned}$$

式中 g 为式(1)中系统的代数方程表达式。

为了获得 ϕ 和 φ 对参数 λ 的灵敏度，需对式(2)做一阶 Taylor 级数展开，得到

$$\Delta x(t) = \frac{\partial \phi(x_0, t, \lambda)}{\partial \lambda} \Delta \lambda = \frac{\partial x(t)}{\partial \lambda} \Delta \lambda \equiv x_\lambda(t) \Delta \lambda \quad (3)$$

对于 y 有同样的形式

$$\Delta y(t) = \frac{\partial \varphi(x_0, t, \lambda)}{\partial \lambda} \Delta \lambda = \frac{\partial y(t)}{\partial \lambda} \Delta \lambda \equiv y_\lambda(t) \Delta \lambda \quad (4)$$

式(3)(4)中的 x_λ 和 y_λ 就是 x 、 y 关于参数 λ 的轨迹灵敏度。

对方程(1)进行关于 λ 的微分，即

$$\begin{aligned} \dot{x}_\lambda &= \frac{\partial f}{\partial x}(t)x_\lambda + \frac{\partial f}{\partial y}(t)y_\lambda + \frac{\partial f}{\partial \lambda}(t) \equiv \\ & f_x(t)x_\lambda + f_y(t)y_\lambda + f_\lambda(t) \end{aligned} \quad (5)$$

$$0 = \frac{\partial g}{\partial x}(t)x_\lambda + \frac{\partial g}{\partial y}(t)y_\lambda + \frac{\partial g}{\partial \lambda}(t) \equiv$$

$$g_x(t)x_\lambda + g_y(t)y_\lambda + g_\lambda(t) \quad (6)$$

式中 f_x 、 f_y 、 f_λ 、 g_x 、 g_y 、 g_λ 都是随时间变化的矩阵。

由式(2)的初始条件可得 x_λ 的初始条件为 $x_\lambda(t=0) = 0$ 。又由式(6)可得 y_λ 的初始条件为 $g_y(0)y_\lambda(0) + g_\lambda(0) = 0$ 。对式(5)(6)求解即可获得输出结果对参数的轨迹灵敏度^[12]。

2 概率分配法的基本思想

2.1 基本思想

概率分配法的基本思想是在已知参数概率分布的基础上，将系统响应近似表示为模型参数的多

项式函数

$$\tilde{Y} = \tilde{g}(\lambda) \quad (7)$$

式中： λ 为模型不确定参数； \tilde{Y} 为响应的估计值。

一旦可以找到关于响应的这种表达式，即可对原有模型进行降阶，此时再结合传统的不确定分析方法，便可很快地估计出响应的不确定度。

设实际的响应为不确定参数 λ 的函数 $Y = g(\lambda)$ ，PCM 方法中最重要的步骤就是选择输入参数 λ 的值，以确保估计值 $\tilde{Y} = \tilde{g}(\lambda)$ 可正确描述响应 Y 的特性，这需要借助高斯求积公式和正交多项式的思想来实现。

2.2 高斯求积公式

高斯求积公式可近似表示为

$$\int_A k(x)\tilde{g}(x)dx \approx \sum_{i=0}^n k_i \tilde{g}(x_i) \quad (8)$$

式中： k_i 为只依赖于概率密度函数 $k(x)$ 的求积系数； $x_i(i=0,1,\dots,n)$ 为求积节点， $x_i \in A$ 。

根据高斯求积公式定理，求积公式(8)的求积节点 $x_i \in A$ 是高斯节点的充分必要条件。它是这些求积节点为零点的多项式

$$\omega_{n+1}(x) = (x-x_0)(x-x_1)(x-x_2)\dots(x-x_n)$$

与任何次数不超过 n 的多项式 $P(x)$ 带权 $\rho(x)$ 正交，所以有 $\int_A P(x)\omega_{n+1}(x)\rho(x)dx = 0$ ，因此 x_i 的求解

可通过构造正交多项式来实现^[18]。

2.3 正交多项式

若多项式函数族 $h_0(x), h_1(x), \dots, h_n(x)$ 满足

$$(h_j, h_k) = \int f(x)h_j(x)h_k(x)dx = \begin{cases} 0, & j \neq k \\ A_j > 0, & j = k \end{cases} \quad (9)$$

则 $\{h_k(x)\}$ 为正交多项式函数族。

根据该性质及高斯求积公式定理，输入参数 x_i ($i=0,1,\dots,n$) 的值即为正交多项式的根。

2.4 PCM 方法

在确定了 $h_0(x), h_1(x), \dots, h_n(x)$ 及参数值 x_i ($i=0,1,\dots,n$) 后， $\tilde{g}(x)$ 可以表示为

$$\tilde{g}(x) = Y_0 h_0(x) + Y_1 h_1(x) + \dots + Y_{n-1} h_{n-1}(x)$$

式中： Y_0, Y_1, \dots, Y_{n-1} 为多项式系数； $h_0(x), h_1(x), \dots, h_n(x)$ 为满足式(9)的关于 x 的正交多项式函数。

$\tilde{g}(x_1), \tilde{g}(x_2), \dots, \tilde{g}(x_n)$ 用矩阵形式表示为

$$\begin{bmatrix} \tilde{g}(x_1) \\ \tilde{g}(x_2) \\ \vdots \\ \tilde{g}(x_n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{n-1}(x_1) & \cdots & h_1(x_1) & h_0(x_1) \\ h_{n-1}(x_2) & \cdots & h_1(x_2) & h_0(x_2) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h_{n-1}(x_n) & \cdots & h_1(x_n) & h_0(x_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Y_{n-1} \\ \vdots \\ Y_1 \\ Y_0 \end{bmatrix} \quad (10)$$

为得到 $\tilde{g}(x)$ 的完整表达式，将式(10)求逆即可

依次求出多项式系数 Y_0, Y_1, \dots, Y_{n-1} :

$$\begin{bmatrix} Y_{n-1} \\ \vdots \\ Y_1 \\ Y_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{n-1}(x_1) & \cdots & h_1(x_1) & h_0(x_1) \\ h_{n-1}(x_2) & \cdots & h_1(x_2) & h_0(x_2) \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ h_{n-1}(x_n) & \cdots & h_1(x_n) & h_0(x_n) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} g(x_1) \\ g(x_2) \\ \vdots \\ g(x_n) \end{bmatrix}$$

由于正交多项式是通过参数 x 的概率密度函数求得, 因此通过正交的性质便可很简单地计算出响应估计值 $\tilde{Y} = \tilde{g}(x)$ 的期望值、方差等统计规律。

期望值为

$$E[\tilde{g}(x)] = \int_A f(x) \tilde{g}(x) dx = Y_0$$

方差为

$$D[\tilde{g}(x)] = \int_A f(x) [\tilde{g}(x) - E(\tilde{g}(x))]^2 dx = \sum_{i=1}^{n-1} Y_i^2 E(h_i^2)$$

3 评估方法

本文采用将轨迹灵敏度法与概率分配法相结合的方法, 定量分析负荷参数的不确定性对动态仿真及稳定的影响。主要思想如下:

首先对系统中所有模型参数进行分析, 确定出需要进行评估的模型参数集。通过计算参数 λ 对仿真输出变量 x 、 y 的轨迹灵敏度 x_λ 和 y_λ , 进而确定出对动态过程影响较大的主导参数。主导参数的个数视轨迹灵敏度的相对大小及所研究问题的需要而定, 参数个数越多计算越复杂, 个数太少结果的指导意义就不明确。根据仿真经验, 一般确定 4~5 个较合适, 计算结果的物理意义可解释性较好。

主导参数确定后, 再应用 PCM 法分析主导参数对仿真结果的影响, 建立主导参数与仿真结果的多项式关系式。PCM 法分析问题的有效性也取决于多项式关系式的阶数, 如何确定其合适的阶数是一个尚待解决的问题。本文采用的方法是: 先分别进行 n 阶及 $n+1$ 阶的 PCM 法拟合, 得到电压的期望值分别为 E_{01} 、 E_{02} , 标准偏差为 D_{01} 、 D_{02} , 定义 2 个误差指标为

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\frac{1}{N} (E_{01} - E_{02})^2}, \quad \varepsilon_2 = \sqrt{\frac{1}{N} (D_{01} - D_{02})^2}$$

定义误差的阈值为 ε , 当 $|\varepsilon_1| < \varepsilon$, 且 $|\varepsilon_2| < \varepsilon$ 时, 可以确定合适的阶次为 n 。本文将 PCM 法的结果与实际值的仿真结果及 Monte Carlo 法的结果进行了对比, 证明了这种方法的有效性。

这种方法不仅能够快速地确定出对稳定性影响较大的主导参数, 且能够建立主导参数与响应之间的多项式关系, 定量分析参数的不确定性, 且只

需通过调整少数几个主导参数即可对响应达到较好的调节效果。

需要注意的是, PCM 法与 Taylor 级数拟合近似法是不同的, Taylor 级数近似是在展开点附近做曲线的切线, 因而这种近似只是一种局部的近似, 且在不同的点展开结果的差异很大, 因此 Taylor 级数法的误差明显高于 PCM 法。

4 仿真分析

4.1 试验系统

以新英格兰 4 机 2 区域系统作为研究对象, 分析负荷模型参数不确定性的影响^[19]。所有发电机均采用 5 阶发电机模型, 负荷采用感应电动机并恒阻抗模型。系统结构如图 1 所示。

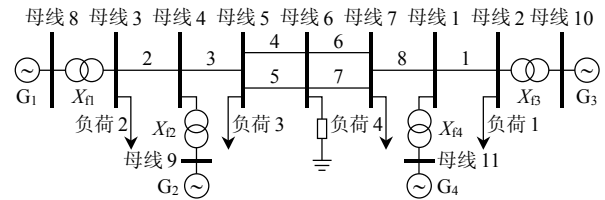


图 1 4 机 2 区域系统

Fig. 1 4-generator-2-area system

故障设置: 1s 时刻, 在母线 6 和母线 7 之间的一回线路上, 靠近母线 6 的 2% 处发生三相接地短路故障, 1.1s 时刻切除这一回故障线路, 仿真总时间 5s。从图 1 可以看出, 本系统共有 4 个负荷, 假设对每一个负荷, 需要研究的不确定参数分别为: 感应电动机定子回路电抗 x_1 ; 转子回路阻抗 r_2 、 x_2 ; 定子开路时间常数 t'_{d0} ; 惯性系数 t_j ; 及等值感应电动机的比例系数 K_{pm} 。分析这 4 个负荷的不确定参数对仿真结果的影响, 一共要分析的参数个数为 24 个。

首先用轨迹灵敏度法分析各个参数对仿真结果的影响。这里所关心的输出响应为 1 号发电机机端电压及 3 号发电机相对于 1 号发电机的功角。仿真结果如图 2—5 所示。

从图 2 和 3 可以看出, 对 1 号发电机机端电压及 3 号发电机功角影响均比较大的参数为 3 号负荷的 r_2 、 x_1 、 x_2 、 t_j 。而其他影响较小的参数可以不予考虑, 这样大大减小了需要分析的参数数目, 降低了问题的复杂度, 提高了效率, 这一点在所分析的系统较大、参数较多时(如区域电网)特别重要。

下面分析参数的不确定性对仿真结果的影响, 以给出参数不确定性的定量指标。以不确定参数定子回路电抗 x_1 为例, 假设参数的不确定度为 $\pm 50\%$,

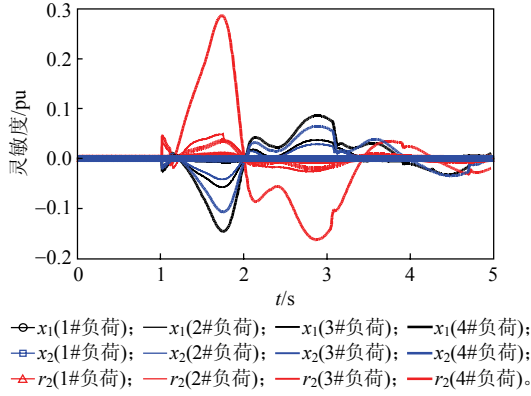


图2 1#发电机端电压对负荷阻抗参数的灵敏度
Fig. 2 Trajectory sensitivity of node voltage of generator 1 to load's impedance parameters

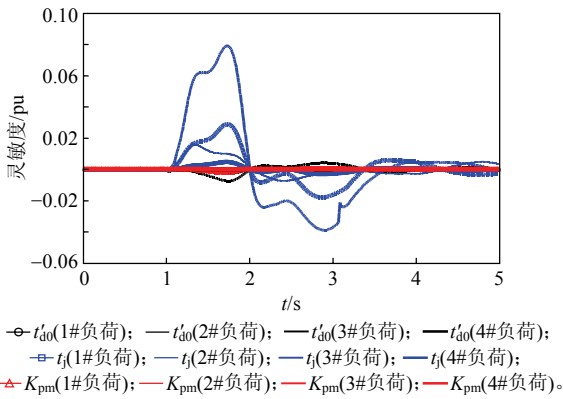


图3 1#发电机端电压对负荷其他参数的灵敏度
Fig. 3 Trajectory sensitivity of node voltage of generator 1 to load's other parameters

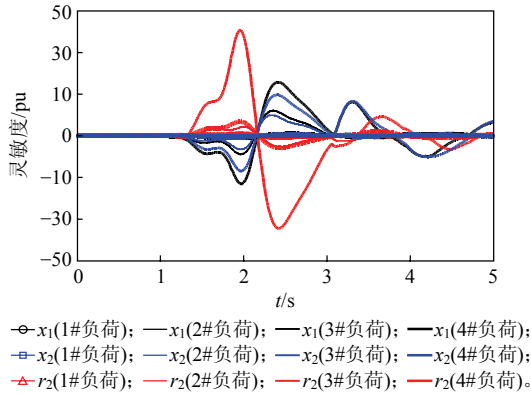


图4 3#发电机功角对负荷阻抗参数的灵敏度
Fig. 4 Trajectory sensitivity of power angle of generator 3 to load's impedance parameters

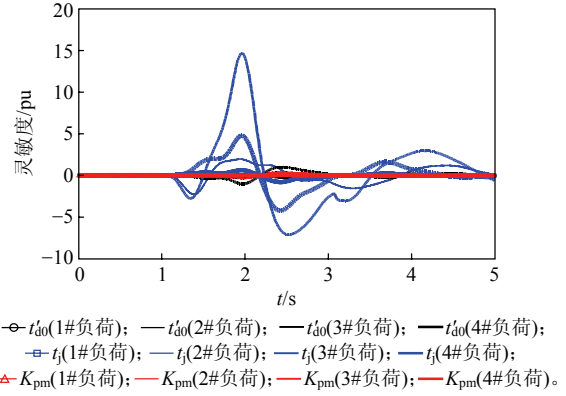


图5 3#发电机功角对负荷其他参数的灵敏度
Fig. 5 Trajectory sensitivity of power angle of generator 3 to load's other parameters

表1 PCM法不同阶数的误差
Tab. 1 Error between different orders of PCM

参数	2阶拟合与线性拟合	3阶拟合与2阶拟合
ϵ_1	3.7440×10^{-4}	1.2914×10^{-4}
ϵ_2	9.8586×10^{-4}	1.2927×10^{-4}

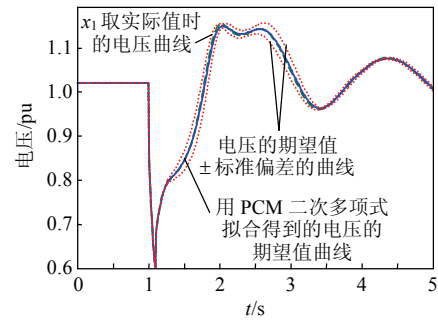


图6 1#发电机机端电压的不确定度
Fig. 6 Voltage uncertainty of generator 1

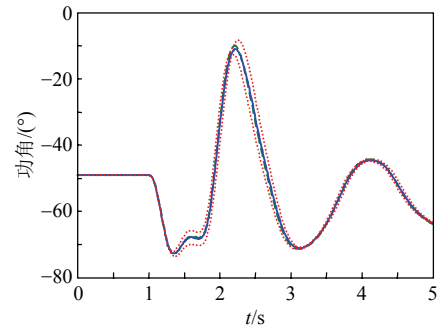


图7 3#发电机对1#发电机功角的不确定度
Fig. 7 Power angle's uncertainty of generator 3 to generator 1

且在该范围内均满足均匀分布，并设多项式函数 $h_0(x)=1$ 。利用评估方法中给出的误差指标，PCM法不同阶数的仿真结果误差如表1所示。

本文设 $\epsilon=0.001$ ，可见2阶PCM多项式拟合即可满足要求。2阶PCM法分析得到的发电机机端电压的不确定度曲线如图6所示。

从图6中可以看出，在 $t=1.86s$ 时，电压偏差达到最大，最大值为0.0119。功角曲线如图7所示，

在 $t=2.1s$ 时功角偏差达到最大，偏差最大值为1.5940。可见功角的实际值与用PCM法得到的结果也基本一致，从而证明了这种方法的有效性。

为验证PCM法得出的电压范围的准确性，将其与传统的蒙特卡罗法进行比较，结果如图8所示。图8中：细线代表用PCM法得出的结果，粗线为用Monte Carlo法仿真得到的结果；上下的细虚线为用PCM法得出的电压期望值标准偏差的曲线；

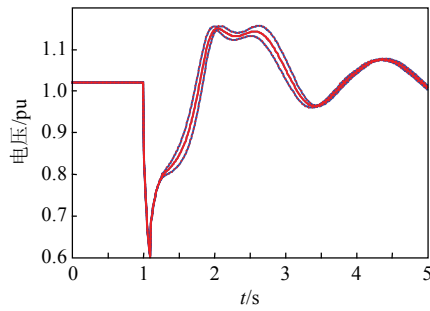


图 8 1#发电机机端电压的对比曲线

Fig. 8 Contrast curve of node voltage of generator 1

上下粗虚线为用 Monte Carlo 法得出的电压期望值 \pm 标准偏差的曲线。在 $t=1.95$ s 时, 两者的误差达到最大, 最大值仅为 9.3546×10^{-4} , 两者得出的结果具有很好的 consistency。

这样只通过少数几次仿真, 便可获得对系统稳定性影响较大的几个参数不确定性影响的定量表示。

4.2 某省级系统的实际算例

该系统的总发电机节点个数为 173, 负荷节点个数为 928。故障设置: 1 s 时刻, 在 67#线路靠近母线 448 的 2% 处发生三相短路, 1.1 s 时刻切除这一回故障线路, 仿真总时间 5 s, 以 136#母线电压为输出响应。仿真结果表明, 对动态过程影响较大的参数为 38#负荷的 r_2 、 x_1 、 x_2 、 t_j 。由于负荷数较多, 这里不再一一列出, 只给出影响较大的 38、39#负荷关于阻抗参数的轨迹灵敏度, 如图 9 所示。

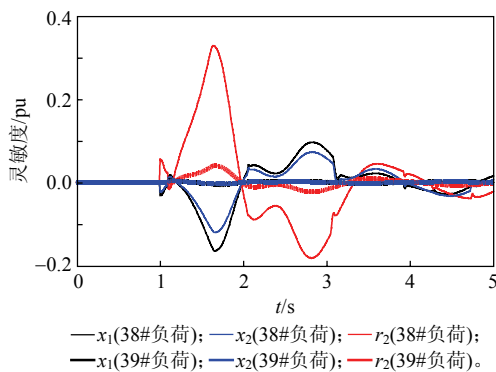


图 9 136#母线电压对负荷阻抗参数的灵敏度

Fig. 9 Trajectory sensitivity of node voltage of bus 136# to load's impedance parameters

图 10 给出了 136#母线电压对 38#负荷定子回路电抗 x_1 的不确定度曲线。图 10 中各曲线所代表的含义与图 6 中相同, 电压真实值与期望值的偏差最大值为 0.0134, 由于参数 x_1 变化导致的电压变化的最大幅度为 0.0944。

假设系统中含有 K 个负荷节点, 则其要分析参数的个数为 $6K$ 个, 采用本方法所需要的仿真次数

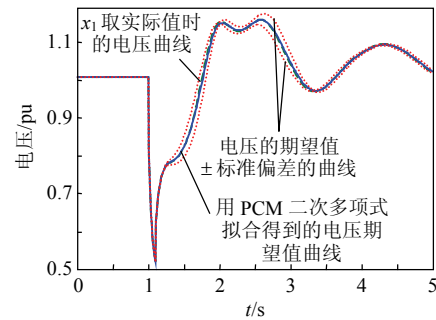


图 10 136#母线电压的不确定度

Fig. 10 Voltage uncertainty of bus 136#

为 $6K + (4 \sim 5) \times 3$ (假设采用 PCM 2 阶近似), 当采用 PCM 法来分析所有参数需要的仿真次数则为 $6K \times 3 = 18K$ 次, 因此本文方法大大减少了仿真次数, 提高了效率。

另外根据本方法确定了主导参数及参数的影响后, 只需要通过调整少数几个主导参数即可对响应达到较好的调节效果, 这对于电力系统的稳定及控制也具有重要意义。通过计算结果也可以清晰地看出主导参数的变化与系统的稳定度之间的关系。这种方法还可以用于模型参数的辨识。

5 结论

1) 本文方法不仅能够从参数集中快速便捷地确定出对稳定性影响较大的主导参数, 而且能够建立主导参数与响应之间的多项式关系, 定量分析参数的不确定性对系统暂态稳定性的影响。

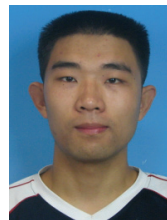
2) 本文提出了相应的误差指标, 并通过前后 2 次的误差进行比较来确定 PCM 法的合适阶次。

3) 另外本文方法只能用来分析单个不确定参数的影响, 当参数个数增加时, 问题的复杂度将随之增加, 这是下一步研究要解决的问题。

参考文献

- [1] Kosterev D, Taylor C, Mittelstadt W. Model validation for the August 10, 1996 WSCC system outage[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [2] 贺仁睦. 电力系统动态仿真准确度的探究[J]. 电网技术, 2000, 24(12): 1-4.
He Renmu. Research into veracity of power system dynamic simulation[J]. Power System Technology, 2000, 24(12): 1-4(in Chinese).
- [3] 孙华东, 周孝信, 李若梅. 感应电动机负荷参数对电力系统暂态电压稳定性的影响[J]. 电网技术, 2005, 29(23): 1-6.
Sun Huadong, Zhou Xiaoxin, Li Ruomei. Influence of induction motor load parameters on power system transient voltage stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(23): 1-6(in Chinese).
- [4] 戴宏伟, 王成山, 余贻鑫. 计及模型不确定性的电力系统小扰动稳定性分析[J]. 天津大学学报, 1999, 23(5): 555-559.

- Dai Hongwei, Wang Chengshan, Yu Yixin. Power systems small disturbance stability analysis considering model uncertainties[J]. Journal of Tianjin University, 1999, 23(5): 555-559(in Chinese).
- [5] 王成山, 王守相. 负荷变化不确定性的配电网重构区间评价方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 49-53.
Wang Chengshan, Wang Shouxiang. An internal assessment method for distribution network reconfiguration considering load uncertainty [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 49-53(in Chinese).
- [6] 白利超, 康重庆, 夏清, 等. 不确定性电价分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 36-41.
Bai Lichao, Kang Chongqing, Xia Qing, et al. Analysis on the uncertainty of electricity price[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 36-41(in Chinese).
- [7] 王函韵, 胡骅, 朱卫东, 等. 信息不确定性对电网无功优化的影响[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 24-28.
Wang Hanyun, Hu Hua, Zhu Weidong, et al. The impact of parameter uncertainty on reactive source optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 24-28(in Chinese).
- [8] 王成山, 王兴刚. 考虑静态电压稳定约束并计及负荷和发电机出力不确定性因素的概率最大输电能力快速计算[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(16): 46-51.
Wang Chengshan, Wang Xinggang. Fast calculation of probabilistic total transfer capability considering static voltage stability constraints and the uncertainties of load and generator output[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(16): 46-51(in Chinese).
- [9] 周保荣, 房大中, 孙景强. 基于轨迹灵敏度分析的电力系统稳定器参数优化设计[J]. 电网技术, 2004, 28(19): 23-26.
Zhou Baorong, Fang Dazhong, Sun Jingqiang. Tuning of PSS parameters using optimization approach based on trajectory sensitivity analysis[J]. Power System Technology, 2004, 28(19): 23-26(in Chinese).
- [10] 张来, 房大中, 杨晓东. 应用轨迹灵敏度优化设计 UPFC 阻尼控制器参数[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 16-20.
Zhang Lai, Fang Dazhong, Yang Xiaodong. Parameters optimization for UPFC damping controller using trajectory sensitivity[J]. Proceedings of Electric Power System and Automation, 2005, 17(5): 16-20(in Chinese).
- [11] Hiskens I, Jassim A. Sensitivity, approximation, and uncertainty in power system dynamic simulation[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(4): 1808-1820.
- [12] Hiskens I, Magnus A. Analysis of the nordel power grid disturbance of January 1, 1997 using trajectory sensitivities[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 987-994.
- [13] Hiskens I, Pai A. Power system applications of trajectory sensitivities [C]//Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA, 2002: 1200-1205.
- [14] Cari E, Alberto L, Bretas N. A methodology for parameter estimation of synchronous generators based on trajectory sensitivity and synchronization technique[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting, Montreal, Canada, 2006: 1-6.
- [15] Nguyen T, Pai A, Hiskens I. Direct computation of critical clearing time using trajectory sensitivities[C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, Seattle, USA, 2000: 604-608.
- [16] 孙景强, 房大中, 周保荣. 基于轨迹灵敏度的电力系统动态安全预防控制算法研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 28-32.
Sun Jingqiang, Fang Dazhong, Zhou Baorong. Study on preventive control algorithm for dynamic security of power systems based on trajectory sensitivity method[J]. Power System Technology, 2004, 28(21): 28-32(in Chinese).
- [17] 周鲲鹏, 陈允平. 运用轨迹灵敏度的电力系统动态安全控制[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 46-50.
Zhou Kunpeng, Chen Yunping. Power system dynamic security control based on trajectory sensitivity[J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 46-50(in Chinese).
- [18] Hockenberry J, Lesieutre B. Evaluation of uncertainty in dynamic simulations of power system models: the probabilistic collocation method[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19(3): 1483-1491.
- [19] 吴文传, 张伯明, 孙宏斌. 在线安全预警和决策支持系统的软件构架与实现[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(12): 23-29.
Wu Wenchuan, Zhang Boming, Sun Hongbin. A study on software framework of an early warning and security countermeasure system for electrical power control centers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(12): 23-29(in Chinese).



陈建华

收稿日期: 2010-08-12。

作者简介:

陈建华(1985), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统暂态稳定、仿真结果的可信度, E-mail: dffg111@gmail.com;

吴文传(1973), 男, 博士, 副教授, 主要从事调度中心自动化系统的研究和教学工作, E-mail: wuwench@mail.tsinghua.edu.cn;

张伯明(1948), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析和调度自动化;

伍双喜(1984), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统动态仿真。

(责任编辑 王晔)