

模型参数不确定性对电力系统时域仿真的影响

王守相, 郑志杰

(天津大学电气与自动化工程学院, 天津 300072)

摘要: 由于模型参数的近似处理和量测误差的存在, 电力系统仿真模型参数的数值具有不确定性。采用蒙特卡罗方法来分析这些不确定性对电力系统仿真计算结果的影响。主要分析了经典模型下发电机的原动机输入机械功率、发电机的转子惯性常数以及仿真计算的初值的不确定性对时域仿真结果的影响。利用新英格兰 10 机 39 节点算例的计算结果分析总结了不同参数的不确定性对时域仿真的影响, 也证明了采用蒙特卡罗方法研究电力系统仿真不确定性问题的可行性。

关键词: 暂态稳定; 时域仿真; 蒙特卡罗方法; 泰勒级数法

Impact of uncertainty of model parameters on power system time domain simulation

WANG Shou-xiang, ZHENG Zhi-jie

(School of Electrical Engineering and Automation, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Due to the approximation and measurement errors to model parameters, there is uncertainty in the parameter value of power system simulation model. Monte Carlo method is introduced in this paper to analyze the impact of uncertainty of model parameters on power system time domain simulation. The impacts of the uncertainty of mechanical power inputs, inertia constants and initial values for classical model on simulation results are discussed. With results of New England 10-unit 39-bus system, the impacts of the uncertainty of different parameters on power system simulation are generalized and the feasibility of Monte Carlo method in dealing with uncertainties in power system simulation is also verified.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50477035) and the Key Grant Project of Chinese Ministry of Education(No.306004).

Key words: transient stability; time domain simulation; Monte Carlo method; Taylor series expansion

中图分类号: TM743 文献标识码: B 文章编号: 1003-4897(2007)04-0036-04

0 引言

在对电力系统仿真计算的研究中, 方法和模型的选择固然重要, 而模型参数获得的准确性对仿真结果准确度的影响也很大^[1,2]。通过在系统中大量安装动态实测装置, 可有助于获取系统元件相对比较准确的参数。但即便如此, 仿真模型参数的不确定性还是客观存在的, 理由有二: 一是仿真数学模型本身是对实体的近似, 模型参数不过是描述实体属性的近似量化指标; 二是在获取模型参数的具体数值时, 由于量测误差的存在和计算机的有限精度表示, 不可能获得参数的精确数值。

人们针对电力系统的不确定性已开展了一系列的研究工作, 内容涉及稳定分析、潮流计算、可靠性计算等诸多方面^[3-6]。

时域仿真方法既可用于详细的暂态稳定计算,

也可辅助进行快速事故扫描等^[7], 在电力系统分析中具有重要的地位。本文主要采用蒙特卡罗(Monte Carlo)方法分析不同参数的不确定性对电力系统时域仿真结果的影响。

1 经典模型下电力系统时域仿真泰勒级数法

为简便起见而又不失一般性, 本文采用的发电机模型为二阶经典模型, 并建立在惯性中心参考系(COI)上。

如果定义惯性中心为:

$$\begin{aligned} \delta_o &= \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \delta_i \\ \dot{\delta}_o &= \frac{1}{M_T} \sum_{i=1}^n M_i \dot{\delta}_i \end{aligned} \quad (1)$$

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50477035); 教育部科学技术研究重大项目(306004)

式中: $M_T = \sum_{i=1}^n M_i$ 。

其中: i 表示第 i 台发电机; δ_i 为转子角;

$M_i = T_i / 2\pi f$; T_i 为惯性时间常数。

则惯性中心参考系中发电机转子运动方程为:

$$\begin{cases} M_i \frac{d\tilde{\omega}_i}{dt} = P_{mi} - P_{ei} - \frac{M_i}{M_T} P_{COI} \\ d\theta_i / dt = \tilde{\omega}_i \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\theta_i = \delta_i - \delta_o$; $\tilde{\omega}_i = \delta_i - \delta_o$

$$P_{COI} = \sum_{i=1}^n (P_{mi} - P_{ei})$$

其中: P_{mi} 为机械功率; P_{ei} 为电磁功率; θ_i 和 $\tilde{\omega}_i$ 分别为转子在 COI 参考系下的角度和角速度; P_{COI} 为 COI 加速功率。

而 P_{ei} 可用下式求出:

$$P_{ei} = E_i^2 G_{ii} + \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (C_{ij} \sin(\theta_{ij}) + D_{ij} \cos(\theta_{ij})) \quad (3)$$

式中: $C_{ij} = E_i E_j B_{ij}$, $D_{ij} = E_i E_j G_{ij}$

其中: B_{ij} 和 G_{ij} 分别为发电机 i 和 j 内节点之间的电纳和电导; E_i 和 E_j 分别为发电机 i 和 j 的暂态电势; $\theta_{ij} = \theta_i - \theta_j$ 为发电机 i 和 j 间的转角差 (COI 参考系下)。

经典模型条件下使用泰勒级数法^[8]进行仿真还要用到电磁功率的各阶导数, 其计算公式为

$$P_{ei}^{(m)} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n (C_{ij} \sin^{(m)}(\theta_{ij}) + D_{ij} \cos^{(m)}(\theta_{ij})) \quad (4)$$

整个时域仿真过程实际就是式 (2) 和式 (3)、式 (4) 的交替求解过程。

2 算例分析

本文采用新英格兰 10 机 39 节点系统作为测试系统, 其原始数据分别取自参考文献[9]。

新英格兰 10 机 39 节点系统单线图见图 1。

新英格兰 10 机 39 节点系统中每台发电机的原动机输入机械功率的标么值、惯性时间常数和各发电机转子角度初值列于表 1 中。故障设定为在零秒时线路 26—27 靠近母线 26 处发生三相接地短路, 故障在 5 个周波 (系统频率为 60 Hz) 时由断开线

路 26—27 而消除。积分步长为 0.01 s, 泰勒级数法阶数取 12, 蒙特卡罗模拟次数为 20 000 次, 采用的随机数在取值区间内呈均匀分布。

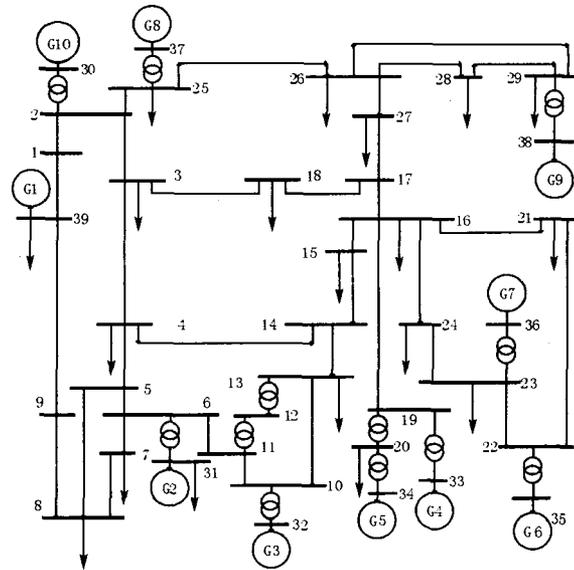


图 1 新英格兰 10 发电机 39 节点系统

Fig. 1 New England 10 unit 39 bus system

表 1 发电机参数

Tab.1 Generator data

发电机	$P_m/p. u.$	T/s	转子角度初值/(°)
1	10.00	1000.0	-6.879 3
2	5.21	60.6	18.217 0
3	6.50	71.6	20.393 9
4	6.32	57.2	19.010 6
5	5.08	52.0	31.548 0
6	6.50	69.6	20.672 6
7	5.60	52.8	21.397 9
8	5.40	48.6	18.673 7
9	8.30	69.0	31.736 3
10	2.50	84.0	0.584 2

需要说明的是, 下面列出的每幅计算结果图中, 均有三条线, 其中上面的一条用“●”标注的曲线为某些参数为不确定值时用蒙特卡罗法计算所得结果的上界; 下面的一条用“*”标注的曲线为某些参数为不确定值时用蒙特卡罗法计算所得结果的下界; 中间的一条用“+”标注的曲线为所有参数均为确定值 (取为参数变动范围的中值) 时计算所得结果。由于表示计算结果的组合很多, 下面仅以发电机 G1 在 COI 参考系中的转子角为例, 给出了计算结果图。

1) 如果 10 台发电机的原动机输入机械功率取值范围为 $[P_m \cdot 0.80, P_m \cdot 1.20]$, 计算结果如图 2 所示。

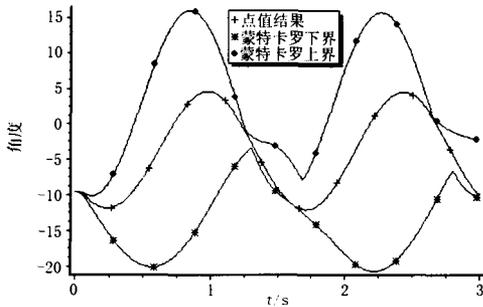


图 2 G1 的转子角
Fig.2 Rotor angle of G1

2) 如果 10 台发电机的原动机输入机械功率取值范围为 $[P_{mi} \cdot 0.70, P_{mi} \cdot 130]$, 计算结果如图 3 所示。

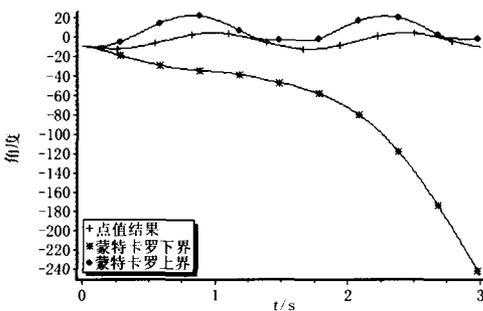


图 3 G1 的转子角
Fig.3 Rotor angle of G1

3) 如果 10 台发电机的转子惯性常数取值范围为 $[M_i \cdot 0.80, M_i \cdot 1.20]$, 计算结果如图 4 所示。

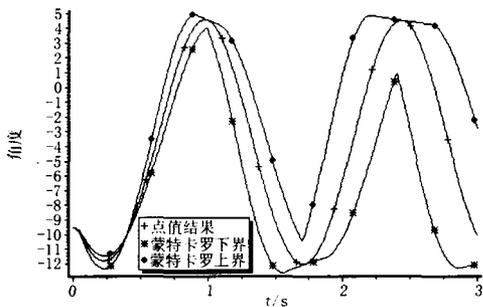


图 4 G1 的转子角
Fig.4 Rotor angle of G1

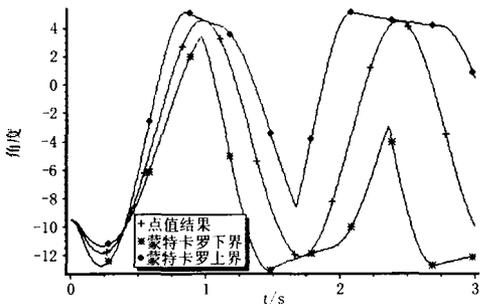


图 5 G1 的转子角
Fig.5 Rotor angle of G1

4) 如果 10 台发电机的转子惯性常数取值范围为 $[M_i \cdot 0.70, M_i \cdot 1.30]$, 计算结果如图 5 所示。

5) 如果十台发电机的转子角度初值取值范围为 $[\delta_i \cdot 0.50, \delta_i \cdot 1.50]$, 计算结果如图 6 所示。

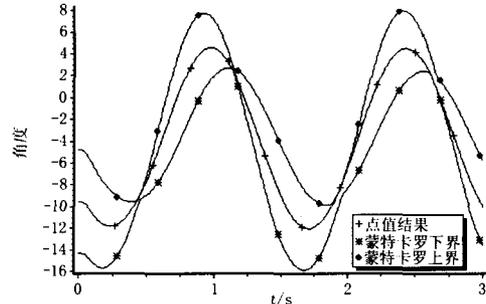


图 6 G1 的转子角
Fig.6 Rotor angle of G1

对上面五个计算结果进行比较, 至少可以观察到以下两个现象:

1) 在发电机的原动机输入机械功率、惯性时间常数和转子角度初值三者中, 以原动机输入机械功率的不确定性对计算结果影响最大, 惯性时间常数次之, 转子角度初值最小。

2) 当取原动机输入机械功率或惯性时间常数为不确定值时, 计算结果的不确定性随着仿真时间的推移有不断增大的趋势; 而当取转子角度初值为不确定值时这一现象则不明显。

其实只要仔细观察发电机数据和计算公式, 我们可以很容易地得出产生以上两个现象的原因。虽然在两个系统中, 惯性时间常数 T 都远大于原动机输入机械功率 P_m , 但我们在计算中实际用到的是 $M = T/2\pi f$ 。经此计算后 M 值则远小于 P_m 。转子角度初值的不确定性对计算结果影响较小的原因则是其在计算中只出现了一次, 而 M 和 P_m 在每一步的计算中都会出现多次。

此外, 仿真结果中曲线有其特异性: 在某些时间点, 用蒙特卡罗仿真所得的上限或下限与确定参数时的结果非常接近但并不重合。通过对计算公式的分析我们认为, 由于正弦和余弦函数的有界性和周期性使得发电机参数在一定范围内变化时, 计算所得的发电机功角的不确定性并不是单调增大的, 而是在达到一极限后又有减小的趋势, 从而导致了这一现象的发生。

3 结论

本文采用蒙特卡罗方法分析了发电机的原动

机输入机械功率、发电机的转子惯性常数以及仿真计算的初值的不确定性对仿真结果的影响。尽管发电机采用的是简单模型,但在原理上与采用复杂模型并无大的区别。作为一项尝试性工作,希望本文能对电力系统动态仿真的不确定性处理或准确度研究起到抛砖引玉的作用。

参考文献

- [1] Kosterev D N, Tylor C W, Mittelstadt W A. 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 Ren-mu. Research into Veracity of Power System Dynamic Simulation[J]. Power System Technology, 2000, 24 (12): 1-4.
- [3] 崔凯, 房大中, 钟德成. 电力系统暂态稳定性概率评估方法研究 [J]. 电网技术, 2005, 29(1): 44-49.
CUI Kai, FANG Da-zhong, ZHONG De-cheng. Study on Probabilistic Assessment Method for Power System Transient Stability[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 44-49.
- [4] 王守相, 王成山. 基于区间算法的配电网三相潮流计算模型 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (2): 52-58.
WANG Shou-xiang, WANG Cheng-shan. Distribution Three-phase Power Flow Models Based on Interval Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (2): 52-58.
- [5] 王成山, 王守相. 基于区间算法的配电网三相潮流计算及算例分析 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (3): 58-62.
WANG Cheng-shan, WANG Shou-xiang. Distribution Three-phase Power Flow Based on Interval Algorithm and Test Results[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (3): 58-62.
- [6] 张鹏, 王守相. 电力系统可靠性经济评估的区间分析方法 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24 (2): 71-77.
ZHANG Peng, WANG Shou-xiang. Novel Interval Methods in Power System Reliability Economics[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24 (2): 71-77.
- [7] 王守相, 张伯明, 郭琦. 在线动态安全评估中事故扫描的综合性能指标法 [J]. 电网技术, 2005, 29(1): 60-64.
WANG Shou-xiang, ZHANG Bo-ming, GUO Qi. Integrated Performance Index Method of Contingency Screening in Online Dynamic Security Assessment[J]. Power System Technology, 2005, 29(1): 60-64.
- [8] 郭志忠, 柳焯. 快速高阶 Taylor 级数法暂态稳定计算 [J]. 中国电机工程学报, 1991, 11(3): 8-16.
GUO Zhi-zhong, LIU Zhuo. Fast Transient Stability Simulation by Higher Order Taylor Series Expansions[J]. Proceedings of the CSEE, 1991, 11(3): 8-16.
- [9] Pai M A. Energy Function Analysis for Power System Stability [M]. Norwell(MA): Kluwer Academic Publishers, 1989.

收稿日期: 2006-10-10; 修回日期: 2006-11-26

作者简介:

王守相 (1973-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为配电网分析、分布式发电系统分析与仿真、电力系统安全性与可靠性评估; E-mail: sxwang@tju.edu.cn

郑志杰 (1981-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统不确定性分析。

(上接第 35 页 continued from page 35)

- [5] Мельников Н А, 等. 330~500 千伏架空输电线路电气部分的设计 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1977.
Н.А.Мельников, et al. Design of 330 ~ 500 kV Overhead Transmission Lines Electrical Part[M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1977.
- [6] 刘振亚. 特高压电网 [M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
LIU Zhen-ya. Ultra-high Voltage Grid[M]. Beijing: China Economy Press, 2005.
- [7] 盛鹁, 李永丽, 李斌, 等. 特高压输电线路过电压的研究和仿真 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15 (6): 13-18.
SHENG Kun, LI Yong-li, LI Bin, et al. Research and Simulation of Overvoltage in UHV Transmission Lines [J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(6): 13-18.
- [8] 贺家李, 李永丽, 郭征, 等. 特高压输电线路继电保护配置方案: (一) 特高压输电线路的结构和运行特点 [J].

电力系统自动化, 2002, 26 (23): 1-6.

HE Jia-li, LI Yong-li, GUO Zheng, et al. Relay Protection for UHV Transmission Lines: Part One Construction and Operation Characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (23): 1-6.

收稿日期: 2006-05-15; 修回日期: 2006-11-28

作者简介:

黄佳 (1982-), 女, 硕士研究生, 主要从事特高压交流输电系统继电保护与过电压的研究; E-mail: huangjiaxue@126.com

王钢 (1966-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统保护与控制、自动化与信息化;

李海锋 (1976-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力系统故障分析与继电保护。