

电力系统暂态稳定数字仿真有效性评价

张恒旭,张 宁,刘玉田

(山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要: 提出了稳定性、极值和均值 3 种仿真误差评价指标,分别反映误差对暂态功角稳定计算结果的宏观影响、全系统观测物理量的最大误差和加权平均误差。其中,稳定性指标由扩展等面积准则(EEAC)提供的稳定裕度定义,可以在宏观层面对仿真误差作出定性和定量的判断;极值指标表征了仿真结果中某个变量与参考结果的最大误差;加权均值指标对不同元件的仿真误差加以不同权重,以突出所关注区域或元件仿真结果的准确程度。基于上述评价指标,以山东电网为例,仿真计算并分析了发电机模型、负荷模型以及积分步长对仿真误差的影响,计算结果表明了所提出误差评价指标的有效性。

关键词: 暂态稳定; 数字仿真; 积分步长; 仿真有效性

中图分类号: TM 743

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)07-0013-04

0 引言

迄今为止,数字仿真在电网规划设计、安全稳定评估、辅助决策和人员培训等工作中仍起着不可替代的作用^[1]。为了得到可靠的结论,必须保证仿真模型能够在一定程度上准确地反映实际系统,并在计算机上正确实现,也即保证仿真的有效性^[2]。

自 Fishman 和 Kiviat 在 1967 年指出仿真模型有效性研究可分为模型的确认和验证以来^[3],其在国防、航空以及流体力学等领域得到普遍应用^[4]。在电力系统数字仿真发展初期,研究人员在电力设备建模方面投入了大量精力,并将其与实际装置进行过对比研究。但长期以来,电力系统仿真有效性问题一直没有得到足够的重视,直到 1999 年才发表了第 1 篇有关电力系统数字仿真验证的文章^[5]。评估

仿真有效性,首先需要进行仿真误差评估^[6],包括定性分析和定量分析。定性分析一般为目测法,受观测者的主观因素影响较大;定量分析可分为基于残差的方法和特征量误差分析法^[7-8],已广泛应用在航空领域。由于电力系统的高维、强非线性特征,需要为其提供更合适的误差评价方法。

文献[9]提出精确仿真的概念,并提出以实测数据作为修正模型和参数的依据以及修正工作思路。文献[10]提出针对不同时段的仿真误差评价指标,包括第 1 摆幅值差、阻尼信息以及误差能量比。这些指标在某些层面反映了动态数据间的接近程度,其中误差能量比能够部分反映对比曲线差异的全局信息,但其缺乏有效的全局性指标;第 1 摆幅值差可以反映首摆失稳模式下仿真结果是趋于保守还是冒进,但无法准确反映多摆失稳模式下对系统稳定性的影响。

现提出基于暂态稳定裕度的稳定性指标、极值

收稿日期:2007-01-16;修回日期:2007-03-20

指标和均值指标等 3 种误差评价指标,并将其应用于山东电网仿真,分析了发电机模型、负荷模型以及积分步长对山东电网仿真误差的影响,计算结果表明了所提指标的有效性。

1 仿真有效性及其评价指标

1.1 仿真有效性

有效性是可用性的度量,与试验条件、应用目的、精度要求和用户需求有关。判断仿真是否准确的理想方法是通过比较仿真结果与实际系统运行结果的偏差计算仿真精度,称为有效性确认。如果实际系统的准确结果无法获取或只能部分获取,则无法准确地计算仿真结果的精度。另外,仿真的绝对精度往往无法得到,故仿真精度一般用可接受的精度范围表示^[6]。

如果实际系统数据无法获取,可以用参考系统的数据取代实际系统数据进行近似的精度计算,并以此作为可信度评估的依据。特殊情况下,参考系统数据也无法得到,只有通过主观评价决定仿真结果是否可用,称为主观有效性评价。

电力系统数字仿真可分为建立数学模型和数学模型求解 2 大模块,其误差来源主要有 3 个方面:模型误差、参数误差和数值求解引入的误差,任何一方面过大的误差都可能导致仿真结果失真严重,据此制定运行控制策略可能导致安全隐患。

1.2 稳定性指标

运行分析人员不仅希望知道在采用的计算条件下误差到底有多大,而且希望知道仿真结果是趋于乐观还是悲观。误差的大小及性质对决策具有重要影响:基于悲观的仿真结果,规划设计将有可能因不必要的加强系统结构和反事故措施而投入过多资金,运行方面则采取过分保守的策略而限制了功率传输,使网络不能发挥最大效能;基于乐观的仿真结果,规划设计中将有可能产生网架结构不够强壮的设计方案,运行方面可能导致计算得到的控制措施力度不够,有可能使系统在预想事故集内的故障作用下失去稳定,带来灾难性后果。

扩展等面积准则 EEAC (Extended Equal Area Criteria)^[11]基于系统受扰轨迹进行暂态稳定评估,是目前唯一应用到大电网在线分析的暂态稳定量化分析方法。以 EEAC 提供的稳定裕度定义仿真误差稳定性评价指标,可以在宏观层面对仿真误差作出定性和定量的判断。稳定性指标 β 定义如下:

$$\beta = \frac{\eta^* - \eta}{|\eta|} \quad (1)$$

式中 η 为参考系统的暂态稳定裕度; η^* 为仿真系统在相同扰动下的稳定裕度; β 的大小表征了仿真误差对稳定性影响的程度,而其符号则表征了影响的趋势,符号为负表示仿真结果偏向悲观,符号为正则表示偏向乐观。

1.3 极值指标

分析人员通常对某些物理量的最大误差感兴趣;定义误差极值指标 H 反映仿真结果偏离参考值的最大程度:

$$h_i = \max \left| \frac{\alpha_{i,t}^s - \alpha_{i,t}}{\alpha_{i,0}} \right| \quad t \in [0, T] \quad (2)$$

$$H = \max h_i \quad i = 1, 2, \dots, N \quad (3)$$

式中 α 为进行校核的物理量,如发电机转子角、母线电压等; i 为元件序号; T 为仿真总时间, t 为各个观测点的时刻; $\alpha_{i,0}$ 为参考系统中相应物理量的初值; $\alpha_{i,t}$ 为参考系统中该物理量在 t 时刻的值; $\alpha_{i,t}^s$ 为仿真系统物理量在 t 时刻的对应值; N 为元件总数。

极值指标表征了仿真结果中某个变量与参考结果的最大误差,从一个侧面反映了误差大小。

1.4 均值指标

补充定义误差在整个观察窗口内的均值指标 F ,可从另一方面反映仿真结果偏离实际值的程度:

$$f_i = \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{\alpha_{i,t}^s - \alpha_{i,t}}{\alpha_{i,0}} \right| dt \quad (4)$$

$$F = \sum_{i=1}^N \lambda_i f_i \quad (5)$$

式中 λ_i 为元件 i 在误差统计中的权重。

均值指标从宏观层面反映了仿真误差的大小,而且可以对不同元件的数据加以不同的权重,以突出所关注区域或元件仿真结果的准确程度。

2 发电机模型对仿真误差的影响

1996 年美国 WSCC 电网事故后分析和其他稳定性分析都表明,不同发电机和负荷模型对稳定计算结果的影响非常大^[5,12-16]。同样,积分步长作为数字仿真中的一个重要参数,也影响着仿真结果。基于上述误差评价指标,以山东电网(464 节点,85 台发电机)为例,研究了发电机模型、负荷模型以及积分步长对仿真误差的影响。仿真工具采用加拿大 Powertech Labs 公司和国电自动化研究院合作开发的 TSAT,其可以提供基于 EEAC 计算得到的暂态稳定裕度。

基于不同简化条件,可得到从二阶到六阶详细程度不等的发电机模型。由于目前山东电网还没有覆盖全系统的动态监测数据可供利用,在此以采用次暂态发电机模型的系统作为参考,分析模型简化产生的仿真误差。如果有全网动态数据可供利用,可以基于相同方法研究仿真结果与实际系统的误差。

针对不同故障类型、不同故障地点进行了大量仿真计算,在此仅给出系统在 3 个三相瞬时短路故障下的仿真误差计算结果。表 1 为发电机采用暂态模型时与采用次暂态模型产生的仿真误差指标,表 2 为发电机采用经典模型时相应的计算结果。负荷均采用由 60 % 恒阻抗与 40 % 恒功率构成的静态模型,积分步长为 0.02 s,且均值指标计算中各元件权重均为 1。图 1 为系统采用不同发电机模型时某台

表 1 暂态模型对仿真结果的影响
Tab.1 Influence of transient generator
model on simulation results

故障	β	H_{δ}	F_{δ}	H_U	F_U
1	-0.140	3.685	0.497	0.140	0.004
2	0.001	3.392	0.373	0.122	0.005
3	0.034	3.890	0.464	0.130	0.005

注: β 为暂态稳定性指标, H_{δ} 为发电机转子角极值指标, F_{δ} 为发电机转子角均值指标, H_U 为母线电压幅值极值指标, F_U 为母线电压均值指标;后同。

表 2 经典模型对仿真结果的影响
Tab.2 Influence of classical generator
model on simulation results

故障	β	H_{δ}	F_{δ}	H_U	F_U
1	-0.380	17.116	4.775	0.227	0.024
2	-0.084	18.460	4.216	0.209	0.025
3	-0.227	21.124	4.625	0.329	0.030

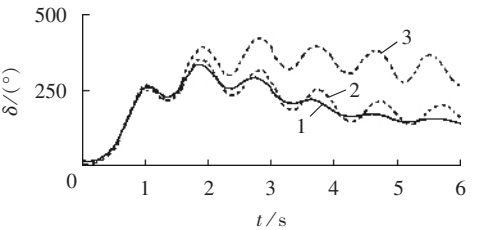


图 1 发电机模型对转子角响应曲线的影响(故障 1)
Fig.1 Influence of generator model on rotor
angle response curve(fault 1)

发电机的转子角曲线(曲线 1、2、3 分别对应次暂态模型、暂态模型、经典模型)。

综合大量仿真结果,发电机模型对仿真结果会产生较大影响,且影响趋势并不固定:在故障 1 作用下,采用暂态模型和经典模型时暂态稳定水平均有所下降,但在故障 2、3 作用下,暂态模型和经典模型却产生相反的作用。稳定性指标较好地反映了发电机模型在稳定性层面对仿真结果定性和定量的影响;极值指标反映了仿真过程中的最大偏差,而均值指标则反映了整个观察窗口中的平均偏差。

3 负荷模型对仿真误差的影响

在进行山东电网方式计算时,采用 60 % 恒阻抗与 40 % 恒功率构成的静态负荷模型。为考察负荷模型的影响,以上述模型为参考,另外选用了 2 种负荷模型:模型 1 由 80 % 恒阻抗与 20 % 恒功率构成,模型 2 由 40 % 恒阻抗与 60 % 恒功率构成。各种计算中发电机均采用次暂态模型,积分步长为 0.02 s。2 种负荷模型在前述 3 种故障作用下的仿真误差统计结果分别见表 3 和表 4。

表 3 负荷模型 1 对仿真结果的影响
Tab.3 Influence of load model 1
on simulation results

故障	β	H_{δ}	F_{δ}	H_U	F_U
1	0.049	1.862	0.363	0.051	0.003
2	0.152	1.695	0.323	0.065	0.003
3	0.364	1.499	0.269	0.112	0.005

表 4 负荷模型 2 对仿真结果的影响
Tab.4 Influence of load model 2
on simulation results

故障	β	H_{δ}	F_{δ}	H_U	F_U
1	-0.086	2.818	0.804	0.112	0.006
2	-0.891	13.090	3.854	0.424	0.018
3	-1.581	313.248	8.671	0.695	0.107

基于 EEAC 理论详细分析发现,负荷模型对暂态功角稳定性的影响与关键摆次的分群方式有关。由于三相短路故障会造成故障后系统电压偏低,恒阻抗负荷比重的增加会减少故障后的负荷需求,而负荷需求变化发生在临界群和余下群会对系统稳定性产生相反的影响:临界群区域内负荷减少不利于稳定性,余下群负荷减少有利于稳定性;负荷增加产生的影响则相反。基于 EEAC 的稳定性误差评价指标较好地反映了负荷模型影响稳定的复杂性。在采用负荷模型 2 时,故障 3 导致系统失稳,从而致使偏差巨大,这在几个指标中表现明显。

4 积分步长对仿真误差的影响

当模型和计算求解方法确定后,积分步长成为影响暂态稳定仿真精确度和效率的主导因素。在暂态稳定仿真计算中,积分步长通常设在 0.01~0.10 s 之间;而对于同一系统、同一观察窗口的仿真计算,分别采用 0.01 s 步长和 0.10 s 步长,计算耗时相差近 10 倍。对于互联大电网而言,由积分步长导致的耗时差别非常明显。

选取积分步长为 0.01 s 时得到的仿真结果作为参考,不同积分步长对仿真误差的影响见表 5,在此仅给出了在故障 1 作用下的计算结果。各种计算中发电机均采用次暂态模型,负荷为由 60 % 恒阻抗与 40 % 恒功率构成的静态模型。

表 5 积分步长对仿真结果的影响
Tab.5 Influence of integral
step-size on simulation results

步长/s	β	H_{δ}	F_{δ}	H_U	F_U
0.02	0.004	0.549	0.208	0.003	0.001
0.04	0.006	1.613	0.533	0.008	0.001
0.06	0.014	2.562	0.698	0.013	0.002
0.08	0.017	4.008	1.040	0.021	0.002
0.10	0.019	5.389	1.309	0.031	0.003

从仿真结果可以看出,积分步长同样会对仿真结果产生明显影响,而各个指标则较好地各个层面反映了这种差异。

5 结论

由于模型、参数以及数学解算方法等因素,电力系统暂态稳定数字仿真不可避免地会存在一定的误差,而该误差则会影响电力系统运行的安全性。为了从更多层面提取仿真误差信息,提出 3 种仿真误差评价指标,结合实际的山东电网,详细研究了发电机模型、负荷模型以及积分步长对仿真误差的影响,结果表明:稳定性指标能够从暂态稳定层面反映仿真

误差的宏观影响,极值指标反映了仿真过程中观测物理量的误差最大值,均值指标则反映了误差在整个观察窗口中的平均值。

所提出的指标丰富了现有的电力系统数字仿真误差评价体系,可供相关研究人员和工程技术人员在进行电力系统暂态稳定数字仿真时参考。密切关注数值分析领域的相关进展,结合电力系统特点,研究提出普适理论,客观评价电力系统暂态稳定数字仿真误差,是进一步研究的方向。

参考文献:

- [1] KUNDUR P. Power system stability and control[M]. New York: McGraw-Hill, 1993.
- [2] 王维平,朱一凡,华学倩,等. 仿真模型有效性确认和检验[M]. 长沙:国防科技大学出版社,1998.
- [3] FISHMAN G S, KIVIAT P J. The analysis of simulation generated time series[J]. Management Science, 1967, 13(7): 525-557.
- [4] 李鹏波,张金槐. 仿真可信性的研究综述[J]. 计算机仿真, 2000, 17(4): 12-14.
LI Peng-bo, ZHANG Jin-huai. An overview of the research on simulation credibility[J]. Computer Simulation, 2000, 17(4): 12-14.
- [5] KOSTEREV D N, TAYLOR C W, MITTELSTADT W A. Model validation for the August 10 1996 WSCC system outage[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(3): 967-979.
- [6] 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.
- [7] 费业察,卢荣胜. 动态测量误差修正原理与技术[M]. 北京:中国计量出版社,2001.
- [8] SHESTAKOV A L. Dynamic error correction method[J]. IEEE Trans on Instrumentation and Measurement, 1996, 45(1): 250-255.
- [9] 贺仁睦. 电力系统精确仿真与负荷模型实用化[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 4-7.
HE Ren-mu. Electric power system accurate simulation and load model utilization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(16): 4-7.
- [10] 高松,贺仁睦,马进,等. 电力系统动态仿真误差评定准则研究[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(4): 6-10.
GAO Song, HE Ren-mu, MA Jin, et al. Error criteria on power system dynamic simulation validation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(4): 6-10.
- [11] 薛禹胜. 运动稳定性量化理论——非自治非线性多刚体系统的稳定性分析[M]. 南京:江苏科学技术出版社,1999.
- [12] 徐征雄. 大区互联系统稳定性计算中负荷模型研究[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 15-19.
XU Zheng-xiong. Dynamic load modeling for transient stability study of regional interconnected power system[J]. Electric Power, 2005, 38(10): 15-19.
- [13] 于浩,刘瑞叶,陈学允,等. 发电机实用模型的选取对稳定计算的影响[J]. 中国电力, 1998, 31(10): 10-13.
YU Hao, LIU Rui-ye, CHEN Xue-yun, et al. Influence on stability calculation using different practical model of generator[J]. Electric Power, 1998, 31(10): 10-13.
- [14] 张红斌,李黎,贺仁睦. 动静态负荷模型在电网暂态稳定计算中的应用[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(6): 49-53.
ZHANG Hong-bin, LI Li, HE Ren-mu. Application of dynamic and static load models to transient stability calculation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(6): 49-53.
- [15] 程颖,鞠平. 负荷动态实测参数与电网稳定计算[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(4): 19-21.
CHENG Ying, JU Ping. Measured dynamic load parameters and power network stability calculation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(4): 19-21.
- [16] 陈凤,李欣然,陈辉华,等. 电动机模型结构及其参数对暂态稳定仿真的影响[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(8): 29-33.
CHEN Feng, LI Xin-ran, CHEN Hui-hua, et al. Effect of induction motor model structure and parameters on simulation computation of electric power system transient stability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(8): 29-33.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:



张恒旭

张恒旭(1975-),男,山东夏津人,讲师,博士,研究方向为电力系统数字仿真、电力系统稳定分析与控制(E-mail: zhanghx@sdu.edu.cn);

张宁(1966-),男,山东肥城人,高级工程师,硕士,研究方向为电力系统运行与控制;

刘玉田(1964-),男,山东青州人,教授,研究方向为电力系统运行与控制。

Validity assessment of power system transient stability numerical simulation

ZHANG Heng-xu, ZHANG Ning, LIU Yu-tian

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: Three assessment criteria of simulation validity are proposed: stability, extremum and mean. The stability index, which is developed based on the transient angle stability margin provided by EEAC (Extended Equal Area Criteria), reflects the impact of simulation error on transient angle stability qualitatively and quantitatively. The extremum shows the maximum deviation of variable from its reference. The mean gives the weighted average error of the simulation errors for different elements, which are given different weight to emphasize the simulation error of the element or area concerned. With Shandong power grid as an example, effects of generator model, load model and integral step-size on simulation errors are studied based on above criteria, and the calculative results show that the proposed assessment criteria of simulation validity are effective.

Key words: transient stability; numerical simulation; integral step-size; simulation validity