

DTS 动态仿真中的用户自定义建模

霍思敏^{1,2}, 邱家驹¹, 杨胜春², 李 峰², 姚建国², 史春^{1,2}

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027; 2. 国网南京自动化研究院/南京南瑞集团公司, 江苏省南京市 210003)

摘要:在调度员培训仿真器(DTS)动态仿真中提出了一种图形化的用户自定义建模(UDM)方法,讨论了其基本原理和程序的实现。这种 UDM 方法是在动态仿真主程序采用联立求解方法下实现的,因而在方便调度员使用的同时提高了仿真的精确度,实时数据库的采用提高了仿真的实时性。在海南电网上的仿真试验结果表明其仿真的精度和速度是满足要求的。

关键词:调度员培训仿真器; 用户自定义建模; 动态仿真

中图分类号: TM743

0 引言

调度员培训仿真器(DTS)是培训调度员以提高其调度水平的重要工具^[1-3]。DTS 中的动态仿真程序内部设置了大量的固定模型,如直流励磁模型、交流励磁模型、无刷励磁模型、自并激励磁模型、复式励磁模型等。然而,随着电力系统的发展,各种新模型不断出现,原有程序中的固定模型已不能满足需要。对此可以有 2 种解决办法:一是在原有程序中由程序开发者继续增加新的模型;二是研究和开发用户自定义建模(UDM——user-defined modeling)的方法。前者开发周期长,可靠性测试困难,故很难及时满足众多用户的不同要求,这种被动的开发方式势必落后于实际的需要;后者是在不改变程序本身的条件下,由用户自行构建新的模型,这极大地增强了 DTS 的灵活性和开放性^[4]。

很多离线的仿真软件都实现了 UDM,如西门子子公司开发的 NETOMAC 采用宏语言的方式来建模,即通过程序预定义的宏指令来指定组成用户模型的基本功能框之间的关系和相应参数^[5];PSS/E 采用类 FORTRAN 语言的方式来建模,即根据用户模型来编写 FORTRAN 程序,通过内置的编译系统在主程序调用时自动执行。这 2 种方法都不够直观,而且要求用户具备很高的专业水平。PSASP 采用图形化的建模方式,但是用户自定义模型和主程序通过磁盘文件交换数据,需要频繁地读写磁盘文件,降低了程序的效率,必然降低仿真的速度。UDM 还未在 DTS 动态仿真中实现,而在 DTS 中实现 UDM 必须兼顾方便性、精确性、实时性 3 个方面^[6]。

本文介绍了用户系统与主系统的关系以及 UDM 的基本原理和程序实现,动态仿真主程序采用联立求解方法实现。采用的图形化建模方式直观、方便,而且用户自定义模型和主程序之间的数据交换采用实时库的方式,数据的交换都在内存中完成以提高效率。

1 用户系统和主系统的关系

具有 UDM 功能的动态仿真程序的用户系统和主系统在数学上可分别表示为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_u = \mathbf{F}_u(\mathbf{X}_u, \mathbf{Y}_u, \mathbf{X}_m, \mathbf{Y}_m) \\ \mathbf{0} = \mathbf{G}_u(\mathbf{Y}_u, \mathbf{Y}_m) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}}_m = \mathbf{F}_m(\mathbf{X}_u, \mathbf{Y}_u, \mathbf{X}_m, \mathbf{Y}_m) \\ \mathbf{0} = \mathbf{G}_m(\mathbf{Y}_u, \mathbf{Y}_m) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\mathbf{X}_u$ 和 $\mathbf{Y}_u$ 分别为用户系统的微分变量和代数变量; $\mathbf{X}_m$ 和 $\mathbf{Y}_m$ 分别为主系统的微分变量和代数变量。

主系统和用户系统处在不同的程序实现单元中,用户系统对主程序而言是一个黑箱,由于无法得到差分式的偏导值,故式(1)和式(2)不能直接联立求解,用户系统只能与主系统交互交替求解,计算过程见图 1。

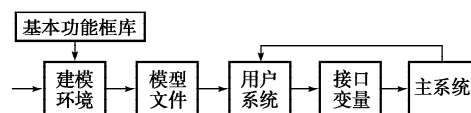


图 1 UDM 的实现
Fig. 1 Realization of UDM

在求解式(2)的过程中,将第 n 次迭代的 $\mathbf{X}_{u,n}$ 和 $\mathbf{Y}_{u,n}$ 看做常量,采用联立求解或者交替求解的方法得到 $\mathbf{X}_{m,n+1}$ 和 $\mathbf{Y}_{m,n+1}$;然后将 $\mathbf{X}_{m,n+1}$ 和 $\mathbf{Y}_{m,n+1}$ 传到用

户系统子程序,并将其作为常量求解式(1)得到 $X_{u,n+1}$ 和 $Y_{u,n+1}$ 。在一个步长的计算过程中,需要多次迭代,以消除交接误差。

2 UDM

UDM 为用户提供了一个统一的平台,使用户无须了解程序内部的结构和算法,由该平台自动与原先的程序接口,用直观的方式自行建立新的模型,从而增强软件对系统元件装置和控制功能扩展的适应能力。

UDM 的平台应该能够以与原仿真软件相匹配的精度来考虑用户模型对主系统的影响,用户模型的求解方法应该具有良好的适应性,能够处理更一般化的数学模型^[7-8],其功能的实现如图 1 所示。UDM 功能由以下几部分构成:

1) 基本功能框库

每个基本功能框实现一个特定的数学运算,如初等函数运算、逻辑运算、非线性函数运算、微积分运算等。基本功能框库所包含的基本功能框是否完备,是满足用户建模需要的基础。

2) 接口变量集

用户定义的模型通过接口变量与主系统交换数据,如图 2 所示。

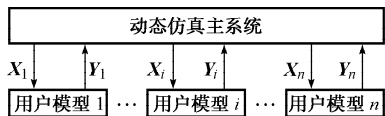


图 2 UDM 与主系统的接口

Fig. 2 Interface between the main system and UDM

接口变量集包括用户模型的输入、输出信息。预先在实时数据库中定义足够的接口变量,动态仿真主系统和用户模型在计算前从实时库中读取数据,计算完之后将结果写入实时库,主程序与用户模型的数据交换都在内存中完成,效率得到大幅度提高。只要程序设定了完备的接口变量集,就能够实现任何自定义模型与主系统的连接。

3) UDM 环境

UDM 环境提供界面友好的建模平台,使工程人员能用简单、直观的方法建模^[9]。用户根据模型的传递函数,将其拆成各个基本功能框的组合,并给各个基本功能框编号,如图 3 所示。然后在基本功能框库中选择适当的功能框,通过基本功能框的拖放和连接,构造出所需要的数学模型,并且指定用户模型和主系统的接口变量,形成模型文件。

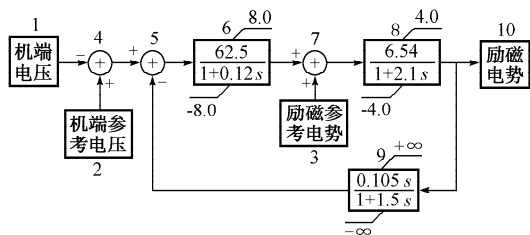


图 3 自定义励磁模型

Fig. 3 User-defined exciter model

4) 自定义模型的计算程序

自定义模型的计算程序分为模型的读入和拓扑分析、模型的预处理、模型的迭代计算 3 部分,它们分别加到动态仿真主程序的启动部分、初始化部分以及迭代计算部分。模型的读入和拓扑分析部分将用到的模型文件读入到程序中,并对模型进行拓扑分析,找出其中的反馈环节。模型的预处理部分对模型读取输入、输出变量,计算各个基本功能框的输入、输出的初值,并检查模型是否初值平衡。如果初值不平衡,需要重新修改模型文件。在模型的迭代计算部分,主程序在一个步长内把自定义模型的输出当做常量,完成一次计算后,将计算结果写入实时库,然后启动用户自定义模型的计算程序。用户自定义模型从实时库中读取用到的输入量,采用前向法完成一次计算,然后将计算结果写入实时库。

3 主程序联立求解时 UDM 的实现

绝大部分商业的动态仿真软件都是采用交替求解的方法,主程序在一次计算过程中将内部模型和自定义模型的输出当成常量来完成一次计算,其调用过程完全相同,因此这种求解方法天然地与 UDM 完全匹配。UDM 实现起来非常方便,但存在较大的交接误差。对采用联立求解的动态仿真软件,动态仿真的主程序和内部模型是采用联立求解的,而自定义模型只能通过接口变量传递计算结果给主程序,它们之间进行交替求解,因而 UDM 实现起来非常困难。DTS 动态仿真的主程序为了提高精确性,降低交接误差,采用了联立求解的方法,因而在主程序联立求解时实现 UDM 能提高仿真的精确性。以发电机的 5 阶模型为例,对主程序联立求解时 UDM 的实现详细说明如下^[10]。

发电机的转子运动方程(隐式梯形法差分化后)为:

$$f_3 = \omega - \alpha_G P_m + \alpha_G [V_x I_x + V_y I_y + R_a (I_x^2 + I_y^2)] - \omega_0 = 0 \quad (3)$$

$$f_4 = \delta - \alpha_j \omega - \delta_0 = 0 \quad (4)$$

考虑原动机调速器模型之后为:

$$f_3 = (1 - \alpha_G \beta_3) \omega + \alpha_G [V_x I_x + V_y I_y + R_a (I_x^2 + I_y^2)] - \alpha_G P_{m0} - \omega_0 = 0 \quad (5)$$

发电机转子绕组的暂态方程(隐式梯形法差分化后)为:

$$f_5 = E_q'' - \alpha_{q1} (I_x \sin \delta - I_y \cos \delta) - \alpha_{q2} E_f - E_{q0}'' = 0 \quad (6)$$

$$f_6 = E_d'' - \alpha_d (I_x \cos \delta + I_y \sin \delta) - E_{d0}'' = 0 \quad (7)$$

考虑电力系统稳定器(PSS)、励磁模型之后为:

$$f_5 = E_q'' - \alpha_{q1} (I_x \sin \delta - I_y \cos \delta) - \alpha_{q2} \alpha_{exc} \alpha_{pss} \omega + \alpha_{q2} \alpha_{exc} \sqrt{V_x^2 + V_y^2} - \alpha_{q2} E_{f0} - E_{q0}'' = 0 \quad (8)$$

如果励磁采用内部模型,那么 f_5 用式(8)表示,则有:

$$\frac{\partial f_5}{\partial I_x} = -\alpha_{q1} \sin \delta, \frac{\partial f_5}{\partial I_y} = \alpha_{q1} \cos \delta, \frac{\partial f_5}{\partial \omega} = -\alpha_{q2} \alpha_{exc} \alpha_{pss},$$

$$\frac{\partial f_5}{\partial \delta} = 0, \frac{\partial f_5}{\partial E_q''} = 1, \frac{\partial f_5}{\partial E_d''} = 0, \frac{\partial f_5}{\partial V_y} = \alpha_{q2} \alpha_{exc} \frac{V_y}{V},$$

$$\frac{\partial f_5}{\partial V_x} = \alpha_{q2} \alpha_{exc} \frac{V_x}{V}。$$

如果励磁采用自定义模型,那么 f_5 用式(6)表示,则有:

$$\frac{\partial f_5}{\partial I_x} = -\alpha_{q1} \sin \delta, \frac{\partial f_5}{\partial I_y} = \alpha_{q1} \cos \delta, \frac{\partial f_5}{\partial \omega} = 0, \frac{\partial f_5}{\partial \delta} = 0,$$

$$\frac{\partial f_5}{\partial E_q''} = 1, \frac{\partial f_5}{\partial E_d''} = 0, \frac{\partial f_5}{\partial V_y} = 0, \frac{\partial f_5}{\partial V_x} = 0。$$

同样,如果原动机、调速器、锅炉采用内部模型,那么 f_3 用式(5)表示;若采用自定义模型,那么 f_3 用式(3)表示,进行与励磁模型类似的处理。

联立求解时 UDM 的实现方法表明,用户自定义模型与内部模型在计算方法上有所差别,但是仿真结果将表明,计算结果的差异是非常小的,仿真的精度和内部模型非常接近。

4 海南电网仿真试验

海南电网有 27 台发电机、79 台变压器、74 条线路、16 台并联电容器、129 个负荷。对海南电网进行仿真试验,所有发电机均采用 5 阶模型。在 220 kV 大鹅 I 线中点发生三相短路故障。若所有发电机的励磁系统采用图 3 所示的内部模型和自定义模型,则发电机摇摆曲线如图 4 所示。

对 2 种情况分别仿真 50 s,全部采用内部模型时,迭代次数为 2 000 次,实际耗时 49.892 s;全部采用自定义模型时,迭代次数为 2 000 次,实际耗时 49.946 s。

比较 2 次仿真的结果可见,所采用的自定义模型在仿真精度和速度上能够与内部模型相媲美,完全满足仿真的要求。

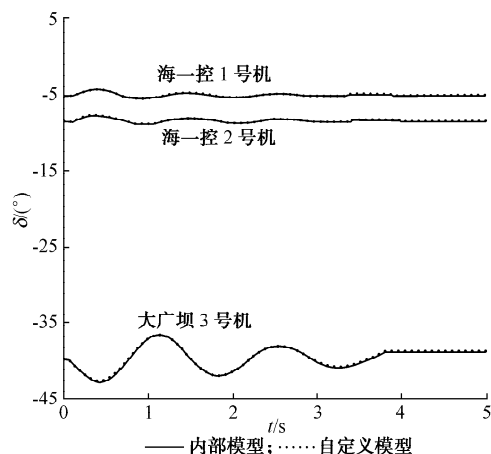


图 4 发电机的摇摆曲线
Fig. 4 Swing curves of generators

5 结语

本文在 DTS 动态仿真中首次提出 UDM 的方法,这种方法非常方便用户增加新的模型,同时新增模型的计算快速、准确,能满足 DTS 仿真的要求,因此这种 UDM 方法已成为 DTS 发展的一个趋势。

DTS 动态仿真的工况是多变的,对每一个工况都手动进行一次初值平衡显得非常烦琐,因此初值自动平衡问题值得进一步研究。

参考文献

- [1] 潘学萍. 电力系统数字仿真研究综述. 江苏电机工程, 2005, 24(1): 80-84.
PAN Xueping. Research summary on power system digital simulation. Jiangsu Electric Engineering, 2005, 24(1): 80-84.
- [2] 汤涌. 电力系统数字仿真技术的现状与发展. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.
TANG Yong. Present simulation and development of power system simulation technologies. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(17): 66-70.
- [3] 姚建国, 王元林, 王力科, 等. 新一代调度员培训仿真器的设计和实现. 电力系统自动化, 1995, 19(2): 12-17.
YAO Jianguo, WANG Yuanlin, WANG Like, et al. Designing and realizing of advanced dispatcher training simulator. Automation of Electric Power Systems, 1995, 19(2): 12-17.
- [4] MOSHREF A, RODOLAKIS A J, BARNES R, et al. Flexible transient stability software features user-defined models. IEEE Computer Applications in Power, 1993, 6(4): 46-51.
- [5] 韩祯祥, 张琦, 徐政. 一个大型集成化的电力系统仿真计算软件: NETOMAC. 电力系统自动化, 1997, 21(9): 47-50.
HAN Zhenxiang, ZHANG Qi, XU Zheng. An integrated software package for power system simulation and computation: NETOMAC. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21(9): 47-50.
- [6] 戴仁昶, 潘哲龙, 孙宏斌, 等. DTS 中动态实时仿真研究. 电力系统自动化, 2000, 24(10): 5-8.
DAI Renchang, PAN Zhelong, SUN Hongbin, et al. Real-time dynamic simulation for DTS. Automation of Electric Power

- Systems, 2000, 24(10): 5-8.
- [7] 张恒旭, 杨卫东, 薛禹胜. 数字仿真中的用户自定义建模技术. 水电自动化与大坝监测, 2003, 27(4): 1-5, 9.
ZHANG Hengxu, YANG Weidong, XUE Yusheng. User-defined modeling technique in power system digital simulation. Hydropower Automation and Dam Monitoring, 2003, 27(4): 1-5, 9.
- [8] 黄英怀. 电力系统分析综合程序的用户自定义模型. 广东电力, 2002, 15(5): 46-48.
HUANG Yinghuai. User-defined model of power system analysis software package. Guangdong Electric Power, 2002, 15(5): 46-48.
- [9] 林济铿, 覃岭, 罗萍萍. 基于 Visual Graph 的电力图形系统开发. 电力系统自动化, 2005, 29(15): 73-76.
LIN Jikeng, QIN Ling, LUO Pingping. Graphic system

- development of power system based on the Visual Graph. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(15): 73-76.
- [10] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析. 北京: 清华大学出版社, 2002.
NI Yixin. Theory and analysis of dynamic power system. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

霍思敏(1979—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统动态仿真. E-mail: huosimin@163.com

邱家驹(1944—), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统分析和控制的研究和教学工作。

杨胜春(1973—), 男, 硕士, 现在主要从事电力系统仿真、电力系统分析和控制方面的研究开发和工程化工作。

User-defined Modeling in Dynamic Simulation of DTS

HUO Simin^{1,2}, QIU Jiaju¹, YANG Shengchun², LI Feng², YAO Jianguo², SHI Chunmin^{1,2}

(1. Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: A new graphical user-defined modeling (UDM) in dynamic simulation of the dispatcher training simulator (DTS) is put forward. Its basic principle and realization flow are discussed. The UDM is realized in dynamic simulation using simultaneous equations, so it can improve the precision of dynamic simulation while facilitating use by the dispatcher. The speed of dynamic simulation can be improved by using the real-time database. The simulation results in Hainan power grid show that the precision and speed are satisfying.

Key words: dispatcher training simulator (DTS); user-defined modeling (UDM); dynamic simulation