基于MATLAB的多机电力系统建模与稳定性分析

李宏伟[1],梁 军[1],贠志浩[1],彭淦榕[2],黄海静[2]

(1. 山东大学电气工程学院,山东 济南 250061; 2. 济南供电公司 山东 济南 250012)

摘要: 简述了MATLAB区别于传统仿真工具EMTP和PSASP的显著特点;利用MATLAB环境下的动态仿真工具Simulink和电力系统工具箱,建立6阶同步电机及其他电力系统元件的数学模型,并对标准IEEE 3机9节点和5机14节点系统进行建模和动态仿真,分析系统在给定运行状况下的稳定性以及提高稳定性的措施。实践表明,MATLAB是进行电力系统建模和仿真分析的强大实用工具。

关键词: 多机系统; 稳定性分析; 仿真模型; 仿真软件

中图分类号: TM71 **文献标识码**: A **文章编号**: 1003-4897(2004)15-0079-06

0 引言

MATLAB是MathWorks公司在80年代推向市场的一种数值型计算软件,它集科学计算、自动控制、信号处理、神经网络和图象处理等功能于一体,具有编程效率高、程序设计灵活、图形功能强等优点。其已经发展成为适合多学科、多种工作平台的功能强劲的大型软件。

MATLAB提供的动态系统仿真工具Simulink用来对动态系统进行建模、仿真和分析,支持连续时间、离散时间及两者混合的线性、非线性系统,也支持多变量、多速率系统。MATLAB提供的电力系统工具箱(Power System Blockset 以下简称PSB)主要是由加拿大的Hydro Quebec和TECSIM International公司共同开发,其功能非常强大,可以用于电路、电力电子系统、电机系统、电力传输等过程的仿真,提供了一种类似电路建模的方式进行模型绘制,在仿真前自动将其变化成状态方程描述的系统形式,然后在Simulink下进行仿真分析。PSB含有丰富的元件模型,包括电力系统网络元件,电机、电力电子器件,控制和测量环节以及三相元件库等[1]。

现在,可使用的系统仿真工具有EMTP、PSASP和MATLAB等。在PSASP中,要通过用户自定义来建立仿真模型,即用户通过类似填写数据的方式自行设计和定义各种系统元件和控制装置,但其功能单元与主系统的连接必须使用表内规定的信息,有一定的局限性,并且PSASP通过用户自定义方法不适宜搭建算法非常复杂的模型,例如进行模糊控制的仿真就比较困难。在EMTP中,虽然提供了强大的电磁暂态计算功能,但由于其模块以及算法缺乏很好的开放性,因此很难在此基础上进行二次开发。而在MATLAB中,电力系统模型可以在Simulink环境下直接搭建,也可以根据所研究对象的物理模型建立其数学模型,并进行封装和自定义为用户自己的模块库,充分显现了其强大的仿真平台以及作图环境的优越性。同时更重要的是,MATLAB提供了丰富的工具箱资源,以及大量的实用模块,在Simulink环境下,不仅可以进行电力系统的仿真计算,还可以实现复杂的控制方法仿真,如神经网络或模糊控制等。

目前,国内外利用MATLAB进行复杂电力系统建模和仿真还处于探索阶段,本文讲述了在MATLAB环境下如何利用Simulink和PSB建立多机系统仿真模型,并对系统的动态特性进行仿真与分析。

1 基于MTALAB的多机系统建模

1.1 同步电机模型

1) 利用PSB建模

MATLAB建模可以直接调用PSB中的电气模块。在PSB中几乎提供了组成电力系统的所有元件,如机电设备、电力电子元件、测量元件等,信号显示、模块连接等模块一般可以在Simulink工具箱中找到。同时PSB提供了图形用户界面(Power GUI),它可以使电路稳态分析得到简化,并且MATLAB中的power2sys函数可以将电路仿真结果转换为A、B、C、D 4个矩阵表示的状态变量形式,实现对仿真结果的计算和分析。

PSB提供了同步电机模型(当输入的机械功率为正值时运行在发电机状态,为负值时运行在电动机状态),其电气部分采用了六阶状态空间模型,其机械系统的方程为:

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

$$\Delta\omega(t) = \frac{1}{2H}\int (T_m - T_e)\,dt - K_d\Delta\omega(t)$$

$$\omega(t) = \Delta\omega(t) + \omega_0$$

其中：K_d 为阻尼系数；H 为转动惯量；两部分综合起来为一个八阶模型。采用默认模型建模与 S 函数法相比将会忽略一些细节问题。

2) 利用 S 函数法建模

MATLAB 环境中最有效的建模方法是通过系统提供的 SystemFunction（下文简称为 S 函数）来实现，称为 S 函数法。S 函数的形式非常全，包括连续、离散和混合系统，几乎所有的 Simulink 模型都可以描述为 S 函数。这种方法完全以设计者设定的数学关系为基础，通过调用 S 函数来建立一个全新的仿真模块，这要求设计者应准确把握控制对象的电气特性。S 函数构建仿真模型的基础是控制对象的状态方程，仿真中 S 函数根据输入量更新状态量进而改变输出量。

设计者按照 S 函数的语法定义，结合特定的控制对象的状态方程，完成相应的子函数即可完成控制对象的建模。同时，Simulink 中提供了 S-Function Builder 和 S-Function 两个模块可以很方便地建立 S 函数，再配合 State Space、Transfer Fcn 等模块即可方便地进行电力系统中各种元件的建模。

一个简单的同步发电机模型可由如下两个公式描述：$T_j\frac{d\omega}{dt} = T_m - T_e - D\omega$，$\frac{d\delta}{dt} = \omega - 1$ 其中，T_j 为惯性时间常数；T_m 为机械转矩；T_e 为电磁转矩；ω 为转速；δ 为发电机功角。对如上方程两端同取拉普拉斯变换，得：

$$\omega(s) = \frac{1}{D + T_j s}(T_m - T_e),\quad \delta(s) = \frac{1}{s}(\omega(s) - 1)$$

利用 S 函数法进一步建立一个简单的同步电机模型，如图 1 所示。

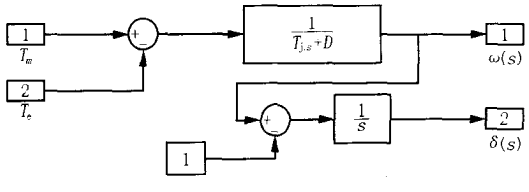


图 1 简单同步电机的仿真模型

Fig. 1 A simple synchronous machine model

本文使用同样的方法搭建了同步电机的实用六阶模型[2]。中六阶模型的 8 个方程左右两端同取拉普拉斯变换，并进行整理可得如下方程组：

$$U_d(s) = E''_d(s) + X''_q i_q(s) - r_a i_d(s) \qquad (1)$$

$$U_q(s) = E''_q(s) - X''_d i_d(s) - r_a i_q(s) \qquad (2)$$

$$E'_q(s) = \frac{E_f(s) - [E'_q(s) - X_{dr}E'_q(s) + X_{dr}E''_q(s)]}{(1 - X_{dr}) + T'_{d0}s} \qquad (3)$$

$$E''_q(s) = \frac{1}{1 + T''_{d0}s}\left[E'_q(s) - (X'_d - X''_d)\,i_d(s)\right] \qquad (4)$$

$$E'_d(s) = \frac{1}{(1 - X_{qr}) + T'_{q0}s}[-X_{qr}E''_d(s)] \qquad (5)$$

$$E''_d(s) = \frac{1}{1 + T''_{q0}s}[E'_d(s) - (X'_q - X''_q)\,i_q(s)] \qquad (6)$$

$$\omega(s) = \frac{T_m(s) - [E''_q(s)\,i_q + E''_d(s)\,i_d - (X''_d - X''_q)\,i_d i_q]}{D + T_j s} \qquad (7)$$

$$\delta(s) = \frac{1}{s}(\omega(s) - 1) \qquad (8)$$

在此基础上，再配合 Simulink 中的 S-Function Builder、S-Function、State Space 以及 Transfer Fcn 等模块进行同步电机的建模，所建模型如图 2 所示。

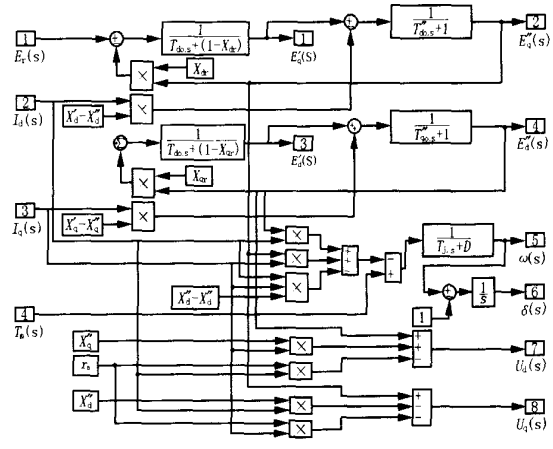


图 2 六阶同步电机的仿真模型

Fig. 2 Simulink block diagram of a synchronous machine with six-order model

同理，用以上方法可以对励磁系统和调速系统进行建模，把建好的六阶同步电机、励磁系统和调速系统组合起来便得到所需的同步发电机模型。

1.2 输电线路模型

MATLAB 中有 PI 型、分布参数和集中参数 3 种输电线模型。当使用 PI 型模拟长线路时可直接输入 PI 型段的数目，而分布参数模型可以更详细地模拟 2 相、3 相和 6 相对称线路，集中参数模型需输入线路的正序和零序阻抗。MATLAB 对输电线路的计算非常细致，例如仅仅一个 PI 型模型在仿真时就可

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

产生 11 个描述电压、电流的状态变量,所以可以用来研究某些非常短暂的过程,比如瞬时过电压等。在 MATLAB 中当然也可以用串联阻抗和并联电容来直接模拟线路。

1.3　Power GUI(Power Graphical User Interface)

Power GUI 模块为我们进行电力系统仿真分析提供了非常有用的图形用户界面。其功能 Phasor simulation 使得整个仿真模型在给定的频率下进行仿真。此相量解法比 MATLAB 的标准解法要快很多。因为在此解法中,网络微分方程由一系列固定频率的代数方程代替,从而大大减少了仿真时间,这将非常适用于多机系统的暂态稳定性仿真。

在搭建仿真模型和设置一定仿真参数后,直接进行多机系统的仿真,系统在开始一段时间内往往不是处在稳态,甚至这种状态会持续很长时间。为了使多机模型在开始进行仿真时便处于稳态,必须学会使用 Load Flow and Machine Initializations 模块。这个模块中最主要的功能是进行潮流计算,并初始化各发电机 、励磁系统、HTG(水轮机及调速器)和 STG(汽轮积极调速器);通过 Update Load Flow 按键,模型自动进行潮流计算,并把计算后实际状态的有功、无功、机械功率、励磁电压等参数直接传递给模型中的发电机、励磁系统、HTG 或 STG 模块,使得多机模型的仿真直接从稳态进行。另外,Machines 列表框将显示模型中所包含的简化同步发电机、同步发电机、非同步发电机和三相动态负荷模块的名称及其各项参数。Bus type 列表框用于设定所选发电机的母线类型(包括 PV Generator、PQ Generator、Swing Bus)。

1.4　仿真流程

各种电力系统元件建模后,在 Simulink 环境下,通过拖拉和连接方式可方便地组建成多机系统的仿真模型。随后,通过 Simulink 已集成好的工具便可进行多机系统仿真;另外,也可以通过编写 power2sys、circ2ss 和 powerinit 等函数来实现系统仿真,仿真流程如图 3 所示。

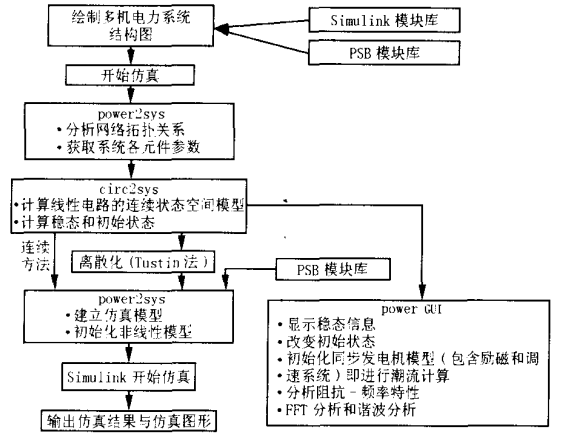


图 3　仿真流程图

Fig. 3　Simulation flow chart

2　多机系统的动态仿真算例

电力系统稳定性问题是指系统在某一正常运行状态下受到某种干扰后,能否经过一定的时间回到原来的运行状态或者过渡到一个新的稳定运行状态的问题。稳定性问题又分为静态稳定性问题和暂态稳定性问题。

2.1　静态稳定性仿真算例

电力系统经常处于小扰动之中,例如负载投切、负荷波动。电力系统静态稳定性是指电力系统受到小干扰后,不发生自发振荡或非周期性失步,自动恢复到初始运行状态的能力。历史上对于单机无穷大系统的静态稳定性问题有了较深入的研究,并有相应的实用判据,但当把一些实用判据扩展用于多机系统时,则存在一定问题。而利用 MTALAB 进行多机系统的建模和仿真,使得多机系统静态稳定分析在机理、数学模型、分析方法、稳定实用判据以及控制对策等方面的研究更加方便和更加深入。

多机系统模型采用 IEEE 标准的 3 机 9 节点模型(如图 4 所示),发电机组 G_1 为平衡节点,发电机组 G_2 和 G_3 为 PV 型节点,各发电机组均含有励磁调节系统。

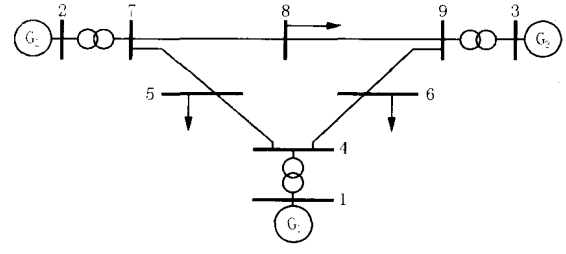


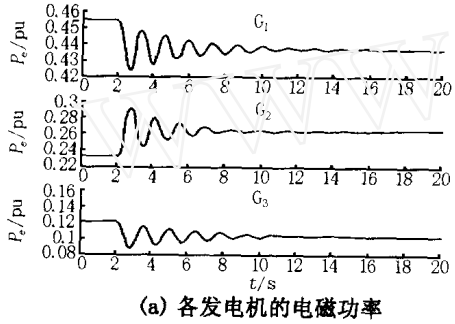
图 4　IEEE 3 机 9 节点系统接线图

Fig. 4　Schematic diagram of IEEE 3-machine 9-bus system

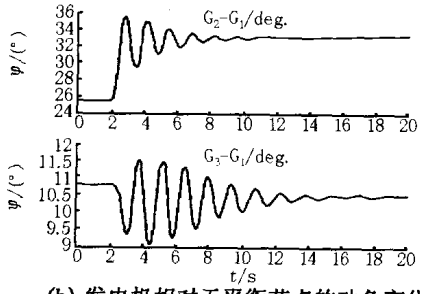
小扰动响应仿真条件为:在 $t = 2$ s 时发电机 G_2 的输入机械功率阶跃 5 %。图 5(a)为 3 台发电机在小干扰下其电磁功率的变化曲线;图 5(b)为发生扰动后,发电机 G_2 和 G_3 分别相对于平衡节点 G_1 的功角变化曲线。由图 4 可分析在发生扰动以后,各发电机的电磁功率经过一定时间的波动而趋于稳定,

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

系统的状态量也没有发生自发振荡或非周期的失步,如发电机功角没有不断地增加或减少而失步,发电机的机端电压最多只有 0.07 %的变化(由于变化很小,没有给出分析图形),并没出现大幅度的下降而使电压崩溃。从而在此扰动下,系统既没出现功角型静稳破坏问题,也没出现电压型静稳破坏问题,其是相对稳定的[3]。



(a) 各发电机的电磁功率



(b) 发电机相对于平衡节点的功角变化

图 5 IEEE 3 机 9 节点系统静态稳定性仿真结果曲线

Fig. 5 Response of static stability of IEEE 3-machine 9-bus system

提高多机系统静态稳定性,从物理意义上讲,就是加强各发电机组间的电气联系,即缩短"电气距离",也就是减小各元件的阻抗,主要是电抗。以下通过仿真分析验证了提高线路额定电压等级可以有效地提高系统的静态稳定性[3,4]。

功率极限和电压的平方成正比,因而提高线路额定电压等级可以提高功率极限。另一方面,由于 $X_1' = X_1 \frac{S_B}{U_{NL}^2}$,其中 U_{NL}^2 为线路的额定电压。因而提高线路额定电压等级也可以等值地看作是减小线路电抗。如图 6 所示,其中虚线为线路额定电压等级为 220 kV 的仿真结果,实线为线路额定电压等级为 500 kV 的仿真结果,可明显地看出线路额定电压等级提高后,各发电机的电磁功率能够较快地趋于稳定,系统静态稳定性有了较大的提高。

2.2 暂态稳定性仿真算例

电力系统暂态稳定是指电力系统在某个运行情况下突然受到大的干扰后,能否经过暂态过程达到

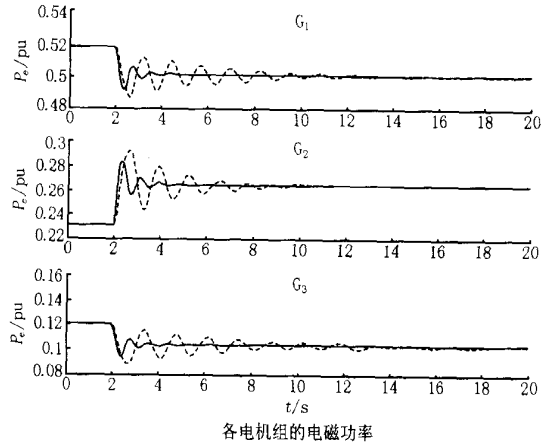


图 6 仿真结果比较

Fig. 6 Comparison of simulation results

新的稳态运行状态或者恢复到原来的状态。这里所谓的大干扰,是相对前面所提到的小干扰而言,一般是指短路故障、突然断开线路或发电机等。

研究暂态稳定性使用的模型是 IEEE 标准的 5 机 14 节点系统。发电机组 G_1 为平衡节点,发电机组 G_2、G_3、G_4 和 G_5 为 PV 型节点,每台发电机组均包含励磁调节系统。系统基准容量为 100 MVA,线路模型采用分布式参数。系统接线图如图 7 所示。

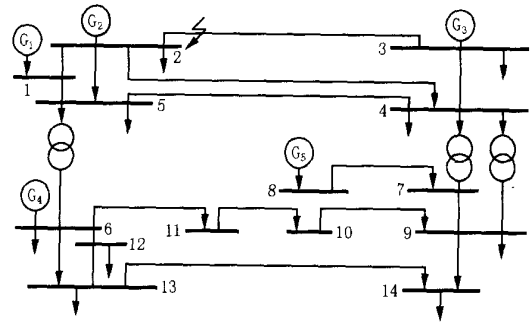


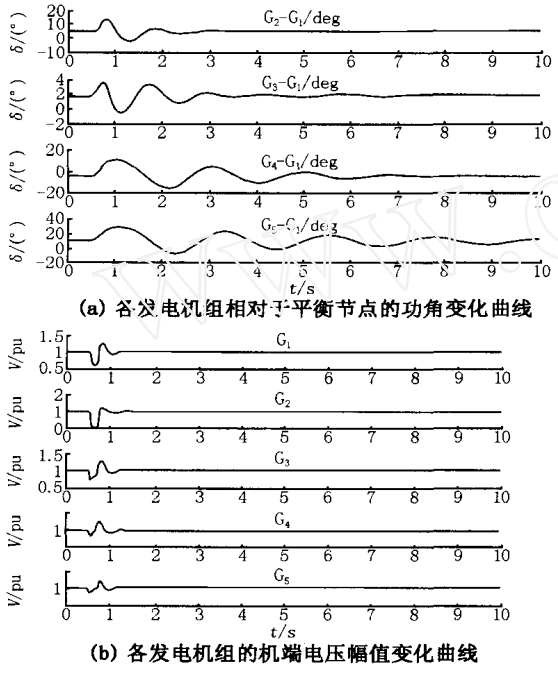
图 7 IEEE 5 机 14 节点系统接线图

Fig. 7 Schematic diagram of IEEE 5-machine 14-bus system

从电力系统稳定分析和控制来看,功角 δ 是最关键、最基本的状态量,其表示电势和电压之间的相位差,即表征系统的电磁关系。在多机系统中,功角差 $\Delta\delta$ 为某一台发电机相对于参考机(或平衡机)的功角变化,表明了该发电机转子与平衡机转子之间的相对运动。在稳态条件下,多机系统中的每台发电机的输入机械转矩和输出的电转矩平衡,转速保持不变;发生干扰后,若某台发电机一时比其他发电机转得快或者慢,则它的转子角位置相对于那些转得慢的或转得快的电机转子角将会超前或滞后;这样所产生的角度差将按功角特性关系把较慢电机所

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

带的部分负荷转移给较快的电机,从而有助于减少转速差和角度差,但若超过某一极限,角度差的增加将伴随传输功率的减少,进而导致系统的不稳定。



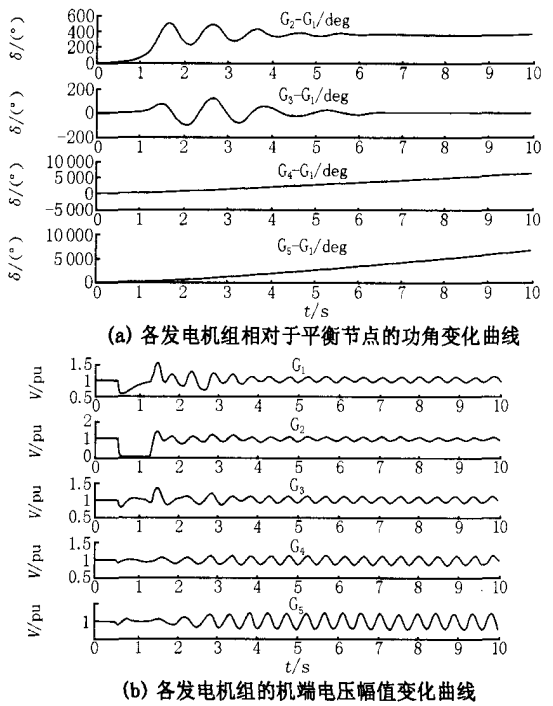
(a) 各发电机组相对于平衡节点的功角变化曲线

(b) 各发电机组的机端电压幅值变化曲线

图 8　IEEE 5 机 14 节点系统暂态稳定性仿真结果 1

Fig. 8　The first result of transient stability of IEEE 5-machine 14-bus system

因而,以下对 IEEE 5 机 14 节点系统进行动态仿真,通过分析各发电机组的功角变化(相对于平衡机)和机端电压变化来研究多机系统的暂态稳定性。暂稳仿真条件为:①在 $t = 0.5$ s 时,母线 2 处发生三相接地故障(如图 7 所示),$t = 0.7$ s 时故障切除,仿真结果如图 8 所示。各发电机的功角差 δ 和机端电压幅值在故障后经过短时间的减幅振荡而达到稳定状态,表明了系统在这种运行情况下是稳定的。②在 $t = 0.5$ s 时,母线 2 处发生三相接地故障(如图 7 所示),$t = 1.3$ s 时故障切除,仿真结果如图 9 所示。在发生故障后,发电机组 G_4 和 G_5 的功角持续增加直到失去同步,被称为一次摇摆不稳定,这是由于同步转矩不足产生的;发电机组 G_2 和 G_3 第一次摇摆时是稳定的,但由于故障没有及时地排除,导致机组的同步转矩不足,使得功角差增大,G_2 的最大功角差达到 500°,G_3 的最大功角差也接近 170°,同时可看到各发电机的机端电压不断振荡,以致整个系统不再能继续运行下去,表明了系统在这种运行情况下是不能保持暂态稳定。由以上仿真分析可看出:快速切除故障,对提高电力系统的暂态稳定性,有着决定性的意义。



(a) 各发电机组相对于平衡节点的功角变化曲线

(b) 各发电机组的机端电压幅值变化曲线

图 9　IEEE 5 机 14 节点系统暂态稳定性仿真结果 2

Fig. 9　The second result of transient stability of IEEE 5-machine 14-bus system

3　结论

本文利用 MATLAB 软件进行多机系统建模和动态仿真,充分显现出 MATLAB 仿真平台的优越性,不仅可在 Simulink 环境下直接搭建系统模型进行电力系统的仿真计算,还可借助 MATLAB 丰富的工具箱资源,实现在电力系统仿真中各种复杂的控制方法,如神经网络或模糊控制等。而且,MATLAB 将计算过程建立在最基本的电路原理和微分方程的求解基础之上,将电磁过程和机电过程同步计算,这使仿真非常细致,可以反映出很细微的变化。实践表明,MATLAB 是进行电力系统建模仿真和系统分析的一个强有力的实用工具。

参考文献:

[1]　陈桂明,张明照,戚红雨,等 (CHEN Gui-ming, ZHANG Ming-zhao, QI Hong-yu, et al). 应用 MATLAB 建模与仿真(Modeling and Simulation Based on MATLAB)[M]. 北京:科学出版社(Beijing: Science Press),2001.

[2]　倪以信,陈寿孙,张宝霖,等(NI Yi-xin, CHEN Shou-sun, ZHANG Bao-lin, et al). 动态电力系统的理论和分析(Theory and Analysis of Dynamic Power System)[M]. 北京:清华大学出版社(Beijing: Tsinghua University Press),

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

2002.

[3] Prabha Kundur. Power System Stability and Control[M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),2001.

[4] 李光琦(LI Guang-qi). 电力系统暂态分析(Power System Transient Analysis)[M]. 北京:中国电力出版社(Beijing: China Electric Power Press),1995.

收稿日期: 2003-11-23; 修回日期: 2003-12-29

作者简介:

李宏伟(1979 -),男,硕士,主要从事电力系统运行与控制领域的研究; E-mail: dragonlhw@mail.sdu.edu.cn

梁 军(1956 -),男,博士,教授,主要从事电力系统运行与控制领域的研究;

贠志浩(1973 -),男,博士,主要从事故障测距领域的研究。

Modeling and stability analysis of multi-machine power system based on MATLAB

LI Hong-wei[1], LIANG Jun[1], YUN Zhi-hao[1], PENG Gan-rong[2], HUANG Hai-jing[2]

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;
2. Jinan Power Supply Company, Jinan 250012, China)

Abstract: This paper introduces the notable characteristics of MATLAB compared with the traditional simulation tool EMTP and PSASP. With Simulink and PSB based on MATLAB, this paper builds the mathematical models of a synchronous machine with six orders and other power system components, then models and simulates the standard IEEE 3-machine 9-bus and 5-machine 14-bus system. The stability of multi-machine system is discussed under the given operating condition. The practice indicates that MATLAB is a powerful tool applied to the modeling and simulation of power system.

Key words: multi-machine system; stability analysis; simulation model; simulation software

(上接第 73 页 continued from page 73)

[4] 林礼清(LING Li-qing). 水电厂设备在线监测与状态检修(On-line Equipment Monitoring and Condition-based Maintenance in Hydropower Station)[J]. 中国电力(Electric Power),2001,34(11):24-27.

[5] 苏鹏声,王欢(SU Peng-sheng, WANG Huan). 电力系统设备状态监测与故障诊断技术分析(Technology Analysis of State Monitoring and Fault Diagnosis in Electric Power System)[J]. 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2003,27(1):61-65.

[6] 褚福磊,卢文秀,张伟,等(CHU Fu-lei, LU Wen-xiu, ZHANG Wei, et al). 水泵水轮机组状态监测与故障诊断系统(State Monitoring and Fault Diagnosis System of Water Pump Turbine)[J]. 水力发电(Water Power),1999,(2):31-33.

收稿日期: 2003-10-29; 修回日期: 2003-12-31

作者简介:

贺晋忠(1975 -),男,硕士研究生,主要研究方向为故障诊断与设备监测的理论与应用。E-mail:zhaoxh688@126.com

Relay protection and on-line state monitoring in water turbine

HE Jin-zhong[1], WANG Ming-zan[1], ZHAO Xue-hua[2]

(1. Northeast University, Shenyang 110004, China; 2. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: This paper analyzes the relation and difference among on-line state monitoring, fault diagnosis and computer relay protection in water turbine. It introduces on-line state monitoring of units in Wanjiazhai hydropower station, discusses the problems which exist in this monitoring system, and presents some suggestions for its improvement and development.

Key words: water turbine; on-line state monitoring; hydropower station; fault diagnosis

© 1994-2007 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net