

基于 Matlab/Simulink 电力系统仿真工具箱的拓展

王印松¹, 岑炜¹, 李涛永², 刘鸿达³

(1. 华北电力大学控制科学与工程学院, 河北 保定 071003; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;
3. 中石油华北油田采油三厂, 河北 河间 062450)

摘要: 在 Matlab/Simulink 环境下, 建立直流锅炉机组蒸汽压力模型, 并通过扰动实验对该模型进行验证, 然后采用 Simulink 软件包中的模块封装技术将其封装成一个子系统模块, 最后将其添加到 SimpowerSystem 模块库中以此来补充电力系统工具箱中所缺乏的锅炉模块, 从而使 SimpowerSystem 模块库更加完善。

关键词: 直流锅炉; 封装模块; 拓展; Matlab/Simulink; 仿真工具箱

Development of power system simulation toolbox based on Matlab/Simulink

WANG Yin-song¹, CEN Wei¹, LI Tao-yong², LIU Hong-da³

(1. College of Control Science and Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. The Third Petroleum Factory of North China Oil Filed
Subsidiary Company, Hejian 062450, China)

Abstract: This paper establishes a supercritical once-through boiler model in the Matlab/Simulink environment and carries on a disturbance experiment to verify the model, then encapsulates it into a subsystem with the Simulink encapsulating technology, finally puts it into the model library of the SimpowerSystem to complete the electrical power system simulation toolbox which is lacking of boiler model, so as to make the SimpowerSystem model library more perfectly.

Key words: once-through boiler; encapsulated module; development; Matlab/Simulink; simulation toolbox

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)20-0084-05

0 引言

Matlab环境下的Simulink是用于对复杂动态系统进行建模和仿真的图形化交互式平台, 运行于Simulink下的SimpowerSystem工具箱是用微分方程刻画的电力系统动态过程的电力系统仿真工具箱。对于SimpowerSystem工具箱, 国内外许多研究人员都对其进行了拓展。其中, 文献[1~3]分别建立了三相永磁同步电机、三相凸极同步电机的动态模型, 并对该模型的动态特性进行了仿真研究; 文献[4]提出了同步电机励磁系统模型, 并在该通用模型中调整了它的极端电压; 文献[5,6]分别建立了液力汽机和汽机的控制模型以及汽轮机调速系统等模型。但是就Matlab7.1来说, 它的电力系统模块库SimPowerSystems并没有涵盖火电机组汽包、直流

锅炉等的控制模型。在这种情况下, 可以建立汽包、直流锅炉控制模型, 并利用Simulink自身提供的封装模块的功能将其封装成一个子系统模块, 然后将该封装模块添加到SimpowerSystem模块库中以此来补充电力系统工具箱中所缺乏的锅炉模块, 从而使模块库更加完善。

1 锅炉模型的建立^[3]

对于锅炉模型的建立, 国内外已经有了很大的发展, 大多采用机理法和测试法等建模方法。所建模型的系数具有明确的物理意义, 一部分是通用系数, 如蒸汽状态参数之间的关系, 这些系数可由拟和公式或查表求得; 一部分是与设备物理结构有关的系数, 这些系数可由设计数据求得; 另一部分系数与机组运行特性有关, 需要根据现场试验数据求得。为了避免数学模型过于复杂无法满足实时运算的要求在建立数学模型时要进行一定的假设。

基金项目: 国家高技术研究发展计划资助项目(863计划)
(2007AA041104)

环节特性忽略后, 只要将锅炉模型的燃水比搭配好, 再对其蒸发部分做相应的改进就可以得到直流锅炉模型了。

本文所建的直流锅炉模型就是在文献[8]中的汽包锅炉机组动态模型的基础上做相应的改进得到的。首先根据能量平衡和质量平衡原理对锅炉输入的燃料量和给水做适当的配比, 使进入蒸发器部分的给水所带热量符合锅炉正常工作的规定值。其次, 由于在直流锅炉中, 给水是在蒸发器上直接由水转变为蒸汽的, 它的建模机理和汽包锅炉大致相同, 但是汽包炉的蓄热系数比较大, 一般可达到 3 266 (MJ/Mpa), 而直流锅炉的热惯性却比较小, 因此不考虑锅炉蓄热, 只考虑过热蒸汽在该部分的延迟时间, 就可以得到直流锅炉蒸发部分的模型。其余部分模型和汽包炉基本相同, 这样就可以得出整个直流锅炉机组的控制模型了, 见图 4。

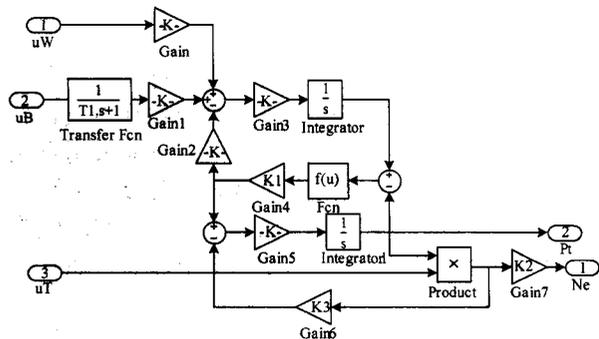


图 4 直流锅炉机组控制模型

Fig.4 500 MW once-through boiler control model

2 模型的封装及电力系统模块库 SimPower Systems 的拓展

2.1 模型的封装

对于复杂的动态系统而言, 系统中包含的功能模块较多, 它们之间的输入输出关系比较复杂, 这无疑会给用户建立系统模型、设置参数进行系统仿真以及对其进行分析带来很大的不便, 尤其对于系统的调式与诊断, 当系统中出现问题时, 难以对其进行分析与定位。而封装模块是 Simulink 强大的功能之一, 使用封装技术则能有效避免上述情况出现, 它可以让用户为子系统或模块定义对话框、图标和帮助文档等选项。

由图 4 所示的直流锅炉模型可以看出该直流锅炉机组模型包含了许多小模块和参数, 每改变需仿真的运行状态时, 必须依次修改不同模型的参数,

若有疏漏, 仿真结果的正确性就很难保证。为了避免这种状况, 可以对相关模型进行封装, 封装过程参照文献[10], 直流锅炉封装模型如图 5。

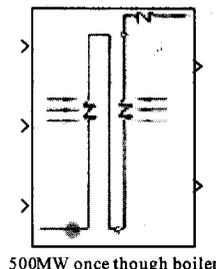


图 5 直流锅炉封装模型

Fig. 5 500MW once-through boiler encapsulated model

将所有属性设置好了后, 按 OK 键, 再重新双击子系统, 就可以得到如图 6 所示的效果。其中, T_1 为燃料热释放延迟时间; H_{wb} 为给水流量增益; K_{eva} 为热释放增益; T_{eva} 为蒸汽在蒸发器中的延迟时间; H_{eva} 为流出蒸发器的蒸汽流量增益; T_t 为蒸汽流经过热器等管道的延迟时间; K_1 、 K_2 、 K_3 为比例系数。

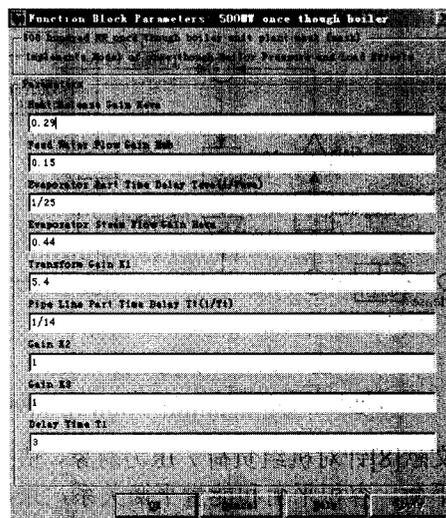


图 6 封装模型参数输入对话框

Fig.6 Parameters input dialog box of the encapsulated model

非线性模型中包含的静态参数在机组稳态运行时进行参数求取, 动态参数可以采用开环或闭环辨识的方法求取。通过 50%~100% 负荷的仿真实验和闭环辨识得到该锅炉机组参数的典型值如表 1。

按照上面步骤, 也可以得到 300 MW、500 MW 和 600 MW 的汽包炉机组封装模块, 其封装模块和图 5 类似, 参数设置对话框和图 6 类似, 具体参数根据具体的实际运行状态和工况确定。

表 1 50%~100%负荷工况下锅炉机组各参数典型值
Tab.1 The representative value of the once-through boiler model at the load is 50%~100%

参数	50%	75%	100%
T1	7	4	2
Hwb	0.25	0.18	0.1
Keva	0.54	0.38	0.2
Teva	45	30	15
Heva	0.6	0.45	0.3
Tt	18	13	9
K1	5.4	5.4	5.4
K2	1	1	1
K3	1	1	1

2.2 电力系统模块库中的 Machines (机构模块集) 拓展

电力系统模块库 SimPowerSystems 主要包括电力系统设计和电路设计等方面的仿真模块, 它主要包括: 电源模块库、元件模块库、机构模块库和连接器模块库等。其中, 机构模块库(Machines)主要包括同步电机模块、异步和同步电机模块、涡轮与调节器模块、汽轮机及调速器模块等, 但是它并没有涵盖汽包锅炉、直流锅炉等模块。所以说目前这个电力系统模块库并不是很完善, 需要将汽包锅炉、直流锅炉等封装模块添加到该模块库中来拓展该模块库。模块库的添加参照文献[10], 添加后的机构模块库(Machines)如图 7。

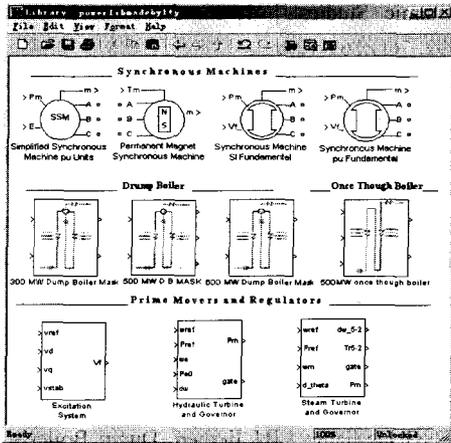


图 7 机构模块库 (Machines)
Fig. 7 Machines library

通过以上步骤可以得到整个电力系统比较完善的模块库, 将该模块库中的汽轮机及调速器模块、发电机模块和 500 MW 直流锅炉模块连接在一块儿, 就可以形成一个完整的超临界机组火电厂仿真模型, 如图 8。

3 直流锅炉模型的扰动实验及实验分析

3.1 模型的扰动实验

通过 3 个扰动实验对模型进行验证, 实验 1 燃料量指令保持 60% 不变, 给水量指令保持 60% 不变, 汽轮机调门开度由 70% 阶跃增加到 80%; 实验 2 燃料量指令由 60% 阶跃增加到 70%, 给水量指令保持 60% 不变, 汽轮机调门开度保持 70% 不变; 实验 3 燃料量指令保持 60% 不变, 给水量由 60% 阶跃增加到 70%, 汽轮机调门开度保持 70% 不变。由此得到的仿真结果如图 9、10、11, 其中 u_B 为燃料量指令, u_W 为给水量指令, u_T 为汽轮机调门开度, N_e 为锅炉出口蒸汽负荷, P_t 为锅炉出口主蒸汽压力。

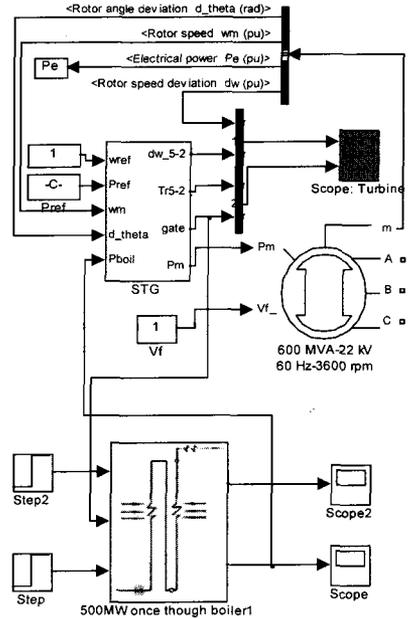


图 8 超临界火电厂仿真模型

Fig. 8 Supercritical thermal power plant simulation model

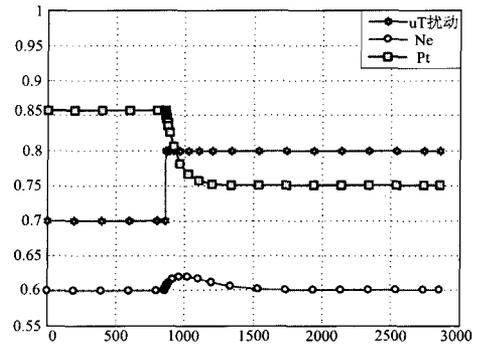


图 9 汽轮机调门开度扰动 10% 时机组的响应曲线
Fig. 9 Response curve of steamer valve opening instruction step increase from 70% to 80%

3.2 实验分析

由上述响应曲线，可以看出该机组直流锅炉模型在汽轮机调门开度阶跃增加扰动下，机前压力降低导致锅炉蓄热释放，机组负荷增加，由于燃料量和给水流量没有变化，锅炉释放出蓄热后，经过一段时间后机组负荷恢复到原来的水平；机前压力随着锅炉蓄热的释放逐渐降低最后稳定。在燃料量阶跃增加扰动下，锅炉各个受热面吸热增加，导致附加蒸发量增加，机组负荷上升；由于蒸汽量增加而汽轮机调门开度不变，机前压力上升至一定水平。在给水流量阶跃增加扰动下，给水流量增加导致附加蒸发量增加，机组负荷和机前压力均上升。这些特性均符合直流锅炉的动态特性，说明该模型正确，可以和汽轮机及发电机机组联合起来做电力系统仿真，如图8所示。

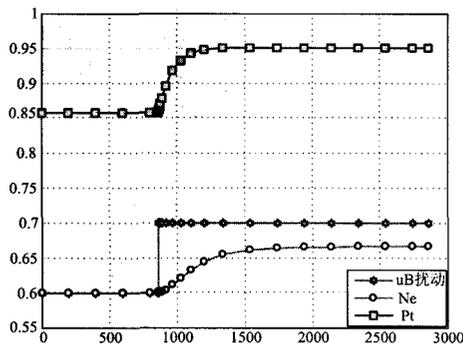


图 10 燃料量扰动 10% 时机组的响应曲线

Fig. 10 Response curve of fuel flow instruction step increase from 60% to 70%

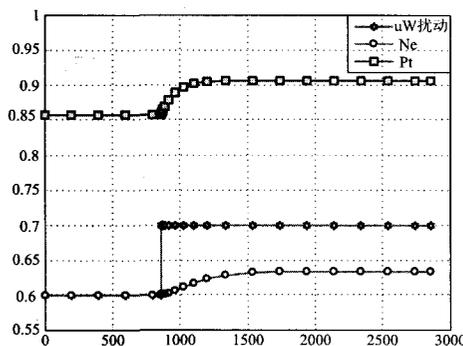


图 11 给水量扰动 10% 时机组的响应曲线

Fig. 11 Response curve of feed water flow instruction step increase from 60% to 70%

4 结论

本文在 Matlab 软件平台上建立了直流锅炉控制模型，并利用封装模块的功能将其进行了封装，

然后添加到 SimpowerSystem 模块库的 Machines 子库中。最后将子库中的直流锅炉模型、汽轮机及调速器、发电机模型连接起来形成了整个火电厂的完整模型并对该模型进行了验证。仿真结果表明，所建锅炉系统仿真模型的稳定性和准确性均已经达到了预期效果。这使得电力系统工具箱中的 Simpower System 模块库更加完善，实现了仿真的快速性，提高了开发效率，从而给仿真研究带来了许多便利。

参考文献

- [1] Grenier D, Dessaint L A, Akhrif O, et al. Experimental Nonlinear Torque Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Using Saliency[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1997,44(5): 680-687.
- [2] Krause P C. Analysis of Electric Machinery[M]. McGraw-Hill, 1986.
- [3] Kamwa I, et al. Experience with Computer-Aided Graphical Analysis of Sudden-Short-Circuit Oscillograms of Large Synchronous Machines[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1995,10(3).
- [4] Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies[S]. IEEE Standard 421.5-1992.
- [5] IEEE Working Group on Prime Mover and Energy Supply Models for System Dynamic Performance Studies. Hydraulic Turbine and Turbine Control Models for Dynamic Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1992, 7(1):167-179.
- [6] IEEE Committee Report. Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1973, 92(6): 1904-1915.
- [7] de Mello F E. Dynamic Models for Fossil Fueled Steam Units in Power System Studies[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1991: 753-761.
- [8] 曾德良, 刘吉臻. 汽包锅炉的动态模型结构与负荷/压力增益预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2000,20(12): 75-79
ZENG De-liang, LIU Ji-zhen. Dump Boiler's Dynamic Model Structure and Load/Pressure Gain Prediction Model [J]. Proceedings of the CSEE, 2000,20(12):75-79.
- [9] 田亮. 单元机组非线性动态模型的研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2005.
TIAN Liang. Research of Unit Plant Nonlinearity Dynamic Model[D]. Baoding: North China Electric Power University, 2005.

(下转第 92 页 continued on page 92)

表 1 负荷预测误差统计表

Tab.1 Load forecasting error statistics

	$e>0.03$ 个数	$e>0.05$ 个数	最大误差	平均误差
Model1	1	0	0.043 5	0.020 5
Model2	47	32	0.120 4	0.037 5
Model3	52	31	0.106 9	0.038 4
Model4	45	26	0.135 8	0.037 1

从图 3 及表 1 可以看出, 通过阈值和差分补偿处理后 2 尺度小波变换负荷预测的误差最大值和平均误差都是最小的。说明本文通过差分补偿法进行序列延拓, 有效避开了边界效应对预测结果的影响; 采用的 Mallat 分解与重构算法、时间序列预测方法适合电力负荷随机序列的特点, 有效地提高了预测结果的精度。

5 结论

小波变换在进行负荷预测过程中, 存在边界效应, 降低了负荷预测的精度。本文首先对历史数据进行了阈值和延拓处理, 并将电力系统负荷转换为随机平稳时间序列。然后利用 Mallat 分解算法将历史负荷数据分解为各个子序列, 应用不同的模型对负荷进行预测。最后利用 Mallat 重构算法将各子序列预测结果进行重构。算例结果表明本文给出的负荷预测方法明显降低了边界效应对预测结果的影响, 提高了预测结果的精度。

参考文献

- [1] 韦钢, 王飞, 张永健, 等. 负荷预测中历史数据缺损处理[J]. 电力科学与工程, 2004, (1): 16-19.
WEI Gang, WANG Fei, ZHANG Yong-jian, et al. Methods of Processing Shortage and Damage of Historical Data in Load Forecasting[J]. Electric Power Science and Engineering, 2004, (1): 16-19.
- [2] 陈亚红, 穆钢, 段方利. 短期电力负荷预报中几种异常数据的处理[J]. 东北电力学院学报, 2002, 22(2): 1-5.
CHEN Ya-hong, MU Gang, DUAN Fang-li. Identification and Management to Anomalous Data in Short-term Load

Forecasting[J]. Journal of Northeast China Institute of Electric Power Engineering, 2002, 22(2): 1-5.

- [3] 陈春琴. 数理统计分析在电力企业负荷预测中的应用[J]. 华东电力, 2006, 34(5): 54-57.
CHEN Chun-qin. Application of Mathematica Statistical Analysis to Load Forecast for Power Enterprises[J]. East China Electric Power, 2006, 34(5): 54-57.
- [4] Hagan M T. The Time Serials Approach to Short Term Load Forecasting [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1987, 2(3): 785-791.
- [5] 田书, 刘团结, 胡艳丽, 等. 基于 QPSO-RBF 的电力系统短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(18): 6-9, 46.
TIAN Shu, LIU Tuan-jie, HU Yan-li, et al. Short-term Electric Power Load Forecasting Based on QPSO-RBF[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(18): 6-9, 46.
- [6] 邵能灵, 侯志俭, 李涛, 等. 基于小波分析的电力系统短期负荷预测方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 46-51.
TAI Neng-ling, HOU Zhi-jian, LI Tao, et al. New Principle Based on Wavelet Transformation for Power System Short-term Load Forecasting [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 46-51.
- [7] 顾洁. 应用小波分析进行短期负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(4): 40-44.
GU Jie. Application of Wavelet Analysis to Short-term Load Forecasting of Power System[J]. Proceedings of the EPSA, 2003, 15(4): 40-44.

收稿日期: 2009-04-09; 修回日期: 2009-04-29

作者简介:

蒋建东(1975-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统分析与故障诊断研究; E-mail: jdjiang@zzu.edu.cn

宋苗菊(1982-), 女, 硕士生, 从事电力系统负荷预测研究;

贾伟(1976-), 男, 学士, 讲师, 从事电力系统继电保护研究。

(上接第 88 页 continued from page 88)

- [10] 范影乐, 杨胜天, 李轶. Matlab 仿真应用详解[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2001.
FAN Ying-le, YANG Sheng-tian, LI Yi. MATLAB's Simulation Application Detailed Interpretation[M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2001.

作者简介:

王印松(1967-), 男, 博士, 教授, 研究方向为智能控制理论、非线性系统分析与控制;

岑炜(1983-), 女, 硕士, 研究方向为超临界火电机组协调控制系统自适应算法研究; E-mail: cenwei2002@163.com

李涛永(1983-), 男, 硕士, 工程师, 研究领域为热工过程模型, 电力需求侧管理技术研究。

收稿日期: 2008-11-05; 修回日期: 2008-11-19