

Matlab 电力系统工具箱在电力系统机电暂态仿真中的应用

周兆庆,陈星莺

(河海大学 电气工程学院,江苏 南京 210098)

摘要: 研究了 Matlab 6.0 中电力系统工具箱 SPS(SimPowerSystems)用于机电暂态仿真的可行性。相比于上一版本 PSB(Power System Blockset),SPS 针对机电暂态仿真的特点,在算法上采用了滤去直流与谐波分量计算的相量法,应用自适应变步长技术避免了通过试算确定仿真步长的繁琐工作,简化了工作量。陈述了 SPS 机电暂态仿真的主要步骤,并分别对单机无穷大系统和 WSCC-9 三机九节点系统进行了小扰动和大扰动下的功角稳定仿真,同时讨论了其仿真环境的设置与加速技巧。结果表明,SPS 可用于电力系统机电暂态分析,且提高了仿真速度。

关键词: 仿真; 机电暂态; Matlab; SPS; 相量法

中图分类号: TM 743; TP 391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)04-0051-04

0 引言

Matlab 是美国 Mathworks 公司推出的适用于多种学科的大型仿真软件。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平台。运行于 Simulink 下的 PSB(Power System Blockset)是针对电力系统的工具箱,从 Matlab 6.0 开始它被重新命名为 SPS(SimPowerSystems)。该工具箱的研究领域是用微分方程刻画的电力系统动态过程,如电磁暂态与机电暂态分析以及电力电子设备的仿真,目前尚不包含状态估计、连续潮流、最优潮流等稳态分析^[1]。

国内常用的电力系统仿真软件是中国电力科学研究院的综合程序 PSASP^[2],它涵盖了电力系统分析的常见功能,并允许用户按照自己的需要设计特殊的模型而无须了解 PSASP 内部结构和编程设计的条件,但是用户建模时的数据环境必须使用系统表内规定的信息,所以在仿真较复杂的控制手段时灵活性较差^[3]。

与 PSASP 相比 SPS 建模方便灵活。在 Simulink 环境下 SPS 可以结合其他功能强大的工具箱构造出令人满意的模型,实现对复杂控制的仿真,SPS 还允许用户使用现有的基本功能模块与自己编制的算法生成自定义模块并将其加入到元件库中,从而最大限度地减少模型误差、提高精度。

Matlab 5.x 中的 PSB 以适用于电磁暂态仿真的详细算法解算机电暂态过程,仿真结果虽然详细但速度过于缓慢^[3]。以往国内更多地使用它进行电磁暂态仿真,对机电暂态仿真讨论的较少^[4]。从 Matlab 6.0 开始,SPS 具备了针对机电暂态仿真的算

法,本文就此研究了利用 SPS 进行电力系统机电暂态仿真的可行性,并对仿真环境的设置与加速技巧进行了讨论。通过稳定仿真的实例证实了 SPS 在继承 PSB 建模方便直观的基础上,对算法作了合理的化简,仿真速度较 PSB 有了很大的提高,同样适用于机电暂态仿真。

1 SPS 工具箱分析

1.1 PSB 模型与算法特点

电力系统暂态可分为毫秒级的电磁暂态和秒级的机电暂态,两者在分析时采用了不同的假设:前者在电机转速恒定的假设下计算电气量,后者忽略了对转矩影响很小的直流与谐波分量。为了提高仿真速度并避免微分方程的刚性问题,在 PSASP 中这两种仿真的模型与算法均是分开的。SPS 与 PSB 则未做此划分,它们对两种暂态的计算使用同一组元件模型。以发电机为例,标准模型的微分方程组除了包含发电机转子电势与机械运动共六阶之外还有定子暂态两阶^[1,5]。

PSB 机电暂态仿真时采用与电磁暂态仿真相同的详细算法解算,其算法有连续法和离散法两种,它们建立在最基本的电路原理和微分方程求解的基础之上,在每一个周期内均采用微秒级的仿真步长(10^{-5} 秒级),逐点求取基波、直流与谐波分量,故障情况下电机定子电流中会出现直流与高次谐波分量,电磁功率曲线带有小幅波动^[3]。此时,PSB 实质上是在进行电磁与机电暂态的混合仿真,在较短时间内可以获得电磁暂态仿真结果,但由于机电暂态过程暂态时间长、状态变量多,即使是对规模很小的系统仿真一次也要耗费数十小时^[3],严重制约了 PSB 在机电暂态仿真中的应用。

1.2 SPS 相对于 PSB 的改进

SPS 采用的模型与 PSB 相同,但在解算方法上作了改进。PSB 仿真过程中存在直流与谐波分量的计算,两种分量对电磁暂态有意义而对机电暂态则贡献很小^[6],为求取它们必须采用微秒级的步长,造成 PSB 机电暂态仿真速度缓慢。对此 SPS 增加了滤去直流与谐波分量计算的相量法,取消了电气状态量不能跃变的约束,将计算内容固定为额定频率下的交流量,仿真步长因此可由微秒级提高至毫秒级,从而减少了仿真步数、缩短了仿真时间。

求解相量方程时 SPS 采用了隐式梯形法,将微分方程在每一时步上差分化为代数方程,同潮流方程一道用牛拉法解算,这不但克服了微分与代数方程之间的交接误差而且具有良好的稳定性。由于对步长具有较好的鲁棒性,用户可以选择 Simulink 微分方程解算器提供的专门针对刚性系统的变步长数值积分方法,使解算器视状态量变化趋势自动选择每一步的步长,而无需通过试算确定。

1.3 仿真流程

用 SPS 仿真机电暂态有 5 个主要步骤。

- a. 在 Simulink 环境下用电力系统元件模块通过鼠标拖拉图形化地搭接系统。
- b. 联接各模块并填写参数,SPS 会检查用户搭接的方块图是否恰当,若有错误将显示错误信息。
- c. 在系统分析图形界面(PowerGUI)中计算系统稳态潮流并设定状态量初始值,确定电力系统状态变量运动轨迹的起始点。然后,选择适合于机电暂态仿真的相量法。
- d. 在 Simulation/Simulation parameters 对话框中设定合适的变步长积分方法。
- e. 在收到仿真开始命令之后,SPS 会检查模型是否正确。如果初始化通过,Simulink 就开始数值积分,用户可以在示波器上看到相关的波形输出,仿真结果也可以用文件的形式保存。

2 功角稳定仿真算例

2.1 小扰动功角稳定仿真算例

2.1.1 算例说明

小扰动功角稳定算例如图 1 所示。
算例参考文献[6]中单机-无穷大系统进行了一些改动。无穷大系统电压等级设为 500 kV,用三相可编程电压源模拟;双圈变压器容量为 3 000 MV·A,变比为 24 kV/500 kV,接线组别 $Y_0/\Delta-11$,短路阻抗 15 % 挂载低压侧,励磁阻抗为 500 倍标么值(不计饱和);输电线路采用分布参数线路模型,单位长度的阻抗与电容值按标准参数设置,并按原电抗标么值折算出线路长度;等值隐极发电机 $4 \times 555 \text{ MV} \cdot \text{A}$,采用八阶发电机模型模拟,自动励磁调节器(AVR)用 Excitation 模块实现,功率型电力系统稳定器(PSS)用 Generic Powersystem Stabilizer 模块模拟,不考虑原动机调速器。发电机与调节器的参数除特别说明外均采用文献[6]提供的数值。

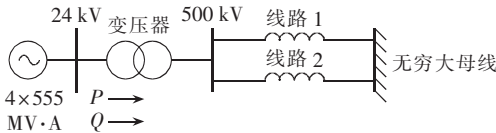


图 1 单机-无穷大系统接线图

Fig.1 Schematic diagram of a single-machine infinite-bus system

改动后的系统有较大的线路充电功率,发电机无功输出降为 0.01 p.u.。算例中的输电线传输容量已接近于 500 kV 线路自然功率,系统在小扰动下很容易发生低频振荡。现设计小扰动为在 $P = 0.7 \text{ p.u.}$ 下发电机有功功率输出 5 % 正阶跃,观察在 PSS 投入与退出两种条件下发电机的功角与转速变化情况。

2.1.2 仿真环境设置

构造仿真系统如图 2 所示。

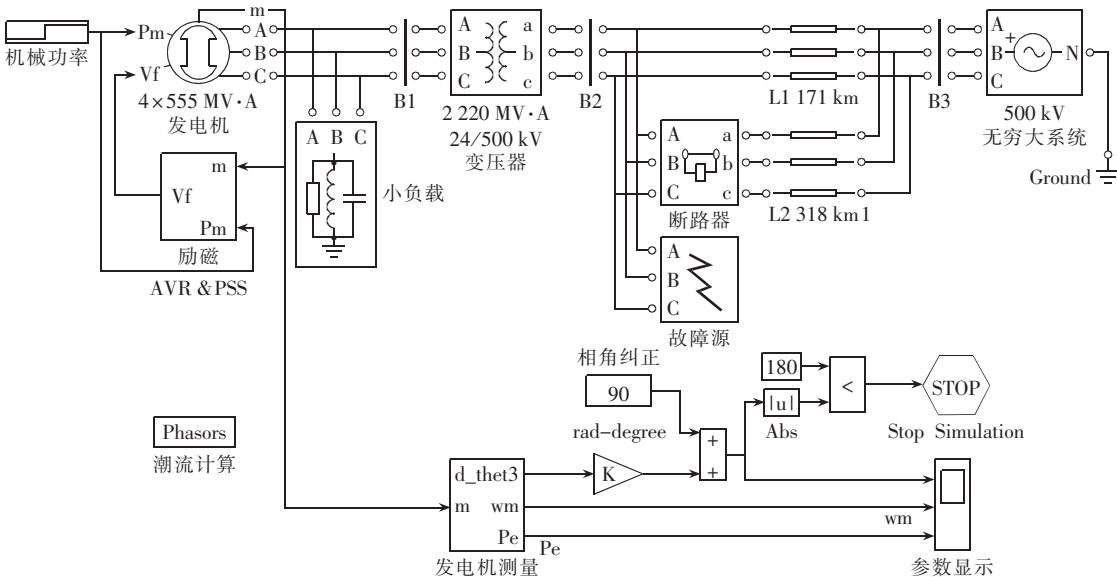


图 2 单机-无穷大系统仿真模块图

Fig.2 Simulink block diagram of the single-machine infinite-bus system

下面归纳仿真环境设置与加速的几个技巧。

a. 图 2 中对励磁系统用子系统进行了包装。展开后如图 3 所示。

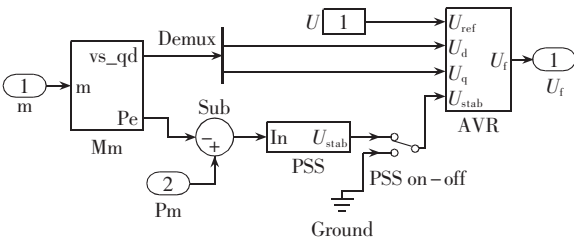


图 3 励磁系统模块图

Fig.3 Block diagram of the excitation system

图中 m 为发电机信号总线; M_m 为发电机测量模块; U 为机端参考电压; U_t 为励磁电压; $Demux$ 为信号分解器。PSS 作为励磁系统的一个子模块, 它的输出是励磁输入信号的一种, 通过 on-off 开关控制投退。

b. 文献[6]并没有考虑励磁机饱和与时滞, 也没有考虑励磁电压的软反馈环节, 而 AVR 模块中有这两个环节, 按标准参数设置。PSS 模块中共有两级超前-滞后环节, 这里只使用了一级, τ_1, τ_2 由原来的 0.154 s, 0.033 s 改为 0.033 s, 1 s。

c. 图 2 中发电机出口处需要挂一个 $1+j1 \text{ V}\cdot\text{A}$ 的小负载作为并联高值对地阻抗, 这是因为 SPS 对发电机这种非线性元件使用电流源模拟, 所以发电机不允许开路也不能与电感元件直接串联^[1,7]。SPS 断路器、电力电子模块中已经内含了这种缓冲支路。

d. 变压器模块中的短路阻抗集中在低压侧, 高压侧的阻抗数值理论上应该是 0, 但在 SPS 中需要用一个很小的数值如 1×10^{-6} 代替(类似情况在其他场合也会遇到)。

e. 发电机测量单元输出的功角在外部补偿 90° , 因为 SPS 规定发电机正方向定子电流产生正向磁链。

f. 发电机节点的类型为 PU 节点, 机端电压 24 kV, 输出功率 $1\,554 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 数值积分方法为针对刚性系统的变步长二阶荣格-库塔方法 ode 23 s, 仿真时间长度设置为 5 s。

g. 为避免失步后无谓的数值积分, 图中设置了仿真的提前终止判据, 如果发电机相角幅值超过 180° 则认为系统已经失步从而停止仿真, 这对于单机-无穷大系统显然是合适的。

2.1.3 仿真结果分析

在上述条件下仿真获得发电机与无穷大系统间相对功角、角速度、电磁功率与机端电压随时间变化的曲线如图 4 所示(曲线 1 是 AVR 投入但 PSS 退出时的情形, 曲线 2 是 AVR 与 PSS 均投入时的情形)。

从图中可见, PSS 投入时发电机功角与转速的改变是稳健的, PSS 退出时发电机运行指标呈发散的振荡而最终失稳, 振荡周期约 1 s。机端电压在 AVR 与 PSS 均投入时有一个升高过程, 这是 PSS 对扰动的响应; PSS 退出时由于发电机与无穷大系统

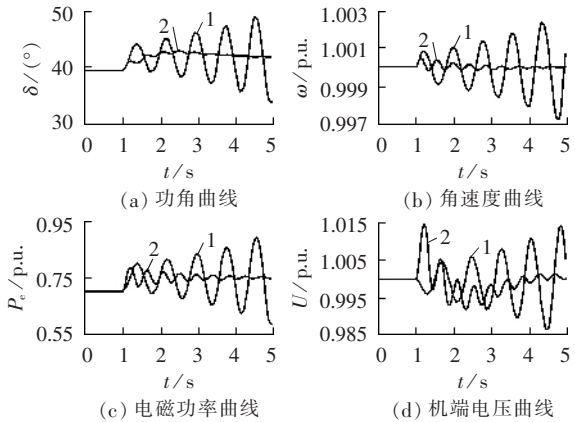


图 4 发电机有功出力由 70 % 阶跃至 75 % 时响应

Fig.4 Response to generator active output step from 70 % to 75 %

之间的功角陷入发散的振荡中, 发电机定子中电流的振荡增大抵消了励磁电压的调节效果, 使得此时的端电压陷入振荡。

此算例说明在系统重载时, 高放大倍数的快速励磁调节器会使系统出现负阻尼变成小扰动不稳定。PSS 有效改善阻尼抑制低频振荡, 是提高电力系统小信号稳定成本最低、收效最大的方法^[6]。

在 Windows 环境下 P4(2.4 GHz) 计算机仿真上述系统时, 选用相量法计算耗时约 20 s, 选用连续法或离散法则 1 h 后计算仍不停止, 可见相量法是机电暂态分析时的优先选择。

2.2 大扰动功角稳定仿真算例

2.2.1 算例说明

大扰动稳定仿真的算例采用 WSCC-9 三机九节点系统^[8], 如图 5 所示。

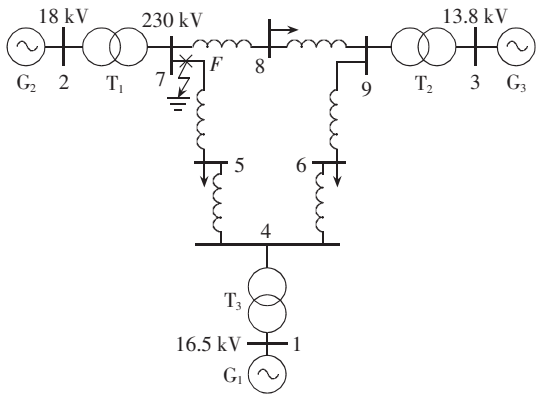


图 5 三机九节点系统

Fig.5 Schematic diagram of WSCC-9 system

系统有 3 台发电机, G_1 是凸极机, 作为系统的平衡节点, G_2, G_3 机是隐极机, 作为 PU 节点(如果它们被设成 PQ 发电机, 则系统故障后开环运行时潮流不能收敛)。所有发电机均装有 AVR 与 PSS, 1 号发电机 PSS 退出。线路采用集总参数 Pi 型模型模拟, 负荷采用恒定阻抗模型, 不考虑原动机调速器。以 $100 \text{ MV}\cdot\text{A}$, 230 kV 为基准, 网络元件的参数与初始潮流可参见文献[8]。

2.2.2 仿真环境设置

仿真算法设置与前例相同,仿真时间长度设置为 4.5 s,几点说明如下。

a. 算例中发电机均采用八阶模型模拟,该模型对隐极机与凸极机略有区别;对隐极机电气部分采用了六阶模型,对凸极机电气部分使用五阶模型不考虑零轴的派克方程,所以 1 号发电机不需要 τ'_{q0}, X'_q 这 2 个参数。

b. 本算例不能用同步机二阶模型构造,该模型只能用于单机无穷大系统。

c. 由于多机系统含有较多的状态变量,仿真之前必须使用 PowerGUI 模块计算潮流初值并完成状态变量的初值设定,以避免仿真初始阶段不必要的暂态过程。如果需从同一初始点出发进行反复计算,可以将扰动发生时间点之前的状态量保存,以避免重复计算。为进一步加速,仿真中不宜打开过多的示波器,并应减小各示波器历史数据的存储以节省内存。

在与上例同样的计算机环境下,仿真上述系统计算耗时约 1 min。

2.2.3 仿真结果分析

设计大扰动为母线 7 F 点三相金属性接地故障,5-7 线路延时断开切除故障。由于故障靠近 G_2 出口,而且故障后 G_1, G_2 之间电气上联系变弱,所以系统的失稳模式是此两机之间首先失去同步。故障后两机间相对功角和角速度随时间变化曲线如图 6 所示。

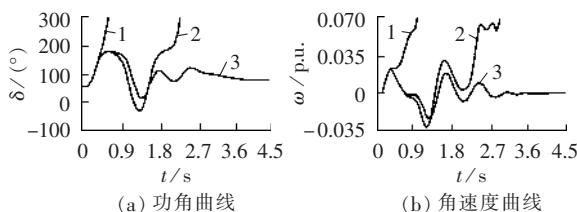


图 6 三相短路切除后发电机功角与转速响应

Fig.6 Response of power angle and rotation speed after three-phase short circuit cleared

图中 3 条曲线分别对应 3 种励磁方案:曲线 1 是恒定励磁电势的情形,此时两机第一摆失稳;曲线 2 是 AVR 投入但 PSS 退出时的情形,此时两机第一摆稳定但在后续摇摆中失稳;曲线 3 是 AVR 与 PSS 均投入时的情形,此时两机间的振荡最终平息。

曲线 1, 2 在功角轨迹第一峰处分叉,说明 AVR 在故障之后的强励可以显著的提高第一摆稳定性,曲线 2 第二摆失稳表明励磁调节器的高放大倍数减弱了发电机的阻尼。功角曲线 2, 3 在第一峰处几乎重合,这说明虽然 PSS 对大扰动后续振荡的抑制效果很好,但它不能显著改善第一摆性能,这是因为 PSS 不能提高发电机在故障情况下的电磁功率,从而不能减小作用在发电机转子上的剩余功率^[6]。

3 结论

Matlab 环境下的电力系统分析工具箱建模灵活直观,新版 SPS 保留了上一版本模型精确、计算精度高的优点,并针对电力系统机电暂态仿真的特点在算法上采用了滤去直流与谐波分量计算的相量法,采用自适应变步长技术避免了通过试算确定仿真步长的繁琐工作,简化了仿真工作量。采用上述方法后 SPS 仿真中小规模电力系统的时间由过去 PSB 的小时级缩短至分钟级。仿真实践表明,SPS 是电力系统机电暂态仿真的有力工具。

参考文献:

- [1] MathWorks. SimPowerSystems for use with simulink, user's guide version 2.0[CP/CD]. [s.l.]: [s.n.], 2002.
- [2] 吴中习, 周泽昕, 张启沛, 等. 《电力系统分析综合程序》用户程序接口 (PSASP/UI) 的开发和应用[J]. 电网技术, 1996, 20(2): 15-20.
WU Zhong-xi, ZHOU Ze-xin, ZHANG Qi-pei, et al. Exploitation and application of PSASP's user interface[J]. **Power System Technology**, 1996, 20(2): 15-20.
- [3] 陆超, 唐义良, 谢小荣, 等. 仿真软件 MATLAB PSB 与 PSASP 模型及仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(9): 23-27.
LU Chao, TANG Yi-liang, XIE Xiao-rong, et al. The analysis of power system models and simulation using Matlab PSB and PSASP [J]. **Automation of Electric Power Systems**, 2000, 24(9): 23-27.
- [4] 吴天明. Matlab 电力系统设计与分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [5] 刘兴杰, 田建设, 丁波, 等. 应用 Matlab 进行电力系统分析和动态仿真[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(3): 43-49.
LIU Xing-jie, TIAN Jian-she, DING Bo, et al. Power system analysis and simulation with Matlab [J]. **Electric Power Automation Equipment**, 2004, 24(3): 43-49.
- [6] KUNDUR P. Power system stability and control [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [7] 李志军, 杨梅, 刘艳萍, 等. Matlab 在同步发电机仿真中的初始化问题[J]. 大电机技术, 2003, (6): 62-66.
LI Zhi-jun, YANG Mei, LIU Yan-ping, et al. Research in several aspects of synchronous machine simulation based on Matlab [J]. **Large Electric Machine and Hydraulic Turbine**, 2003, (6): 62-66.
- [8] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

(责任编辑: 李育燕)

作者简介:

周兆庆(1973-), 男, 江苏扬州人, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制(E-mail: zzzq_hhu@126.com);

陈星莺(1964-), 女, 江苏无锡人, 教授, 主要从事电力系统运行分析、配电自动化及电力市场的研究(E-mail: xychen@hhu.edu.cn)。

Application of SPS in power system electromechanical transient simulation

ZHOU Zhao-qing, CHEN Xing-ying

(College of Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The feasibility of SPS(SimPowerSystem) of Matlab 6.0 in electromechanical transient analysis is studied. Compared with PSB (Power System Blockset) as the previous edition, SPS adopts phasor method, which passes over the calculations of DC and harmonic components according to the characters of electromechanical transient and applies the adaptive variable step to simplify the calculation. Its main implementation steps are described and the power angle stabilities under small and large disturbances are respectively simulated in a single-machine infinite-bus system and the WSCC-9 system. The parameter setting and acceleration skills are discussed. Results show that SPS is useful for the electromechanical transient analysis and speeds up the simulation.

Key words: simulation; electromechanical transient; Matlab; SPS; phasor method