

基于 Matlab 的电力系统分析工具包 PSAT 及其有效性检验

常 勇,徐 政,王 超

(浙江大学 电机系,浙江 杭州 310027)

摘要: 介绍了一种新颖的基于 Matlab 数学语言编写的电力系统分析软件包 PSAT,详述了该软件包源代码开放的特点,介绍了 PSAT 比较全面的模型库,主要包括:电机、电力系统稳定器(PSS)、调压器、柔性交流输电系统(FACTS)、高压直流输电系统(HVDC)、分布式发电系统等。PSAT 功能丰富,目前可完成潮流计算、连续潮流、小信号稳定分析、动态时域仿真及相量测量单元(PMU)配置等方面的分析和研究。通过对同一个典型算例进行时域仿真和特征值分析,将 PSAT 与商业软件 PSS/E 进行了分析对比,结果表明该软件包的计算结果具有一定精度。

关键词: Matlab; PSAT; 电力系统建模; 动态仿真; PSS/E

中图分类号: TM 712; TM 744 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)07-0102-04

0 引言

仿真软件是电力系统科研工作不可或缺的条件,目前国内科研机构以及电力企业中常用的电力系统仿真软件可以分为电磁暂态和机电暂态 2 大类。前者的代表是 EMTP、ATP、PSCAD^[1-2],而后者中常见的有西门子的 PSS/E(Power System Simulator for Engineering)、ABB 公司的 SIMPOW 以及 BPA 等^[3-5]。这些软件大多数为商业软件,其优点是功能全面、计算容量大、计算结果可靠;同时这些软件往往专业性较强不利于普及使用。虽然这些软件中的大多数都有用户自定义模型的功能,然而操作起来往往比较繁琐,移植继承的能力不强。

随着新技术新设备的不断出现以及电力系统的不断发展,许多前所未有的研究课题不断涌现亟待解决^[6-7]。为研究这些问题往往需要构建新的模型,尝试新的算法。而这样的要求用商业电力系统仿真软件来完成较为困难。

最近 20 年来,Matlab、Mathematica 等高级科学语言因其使用方便灵活和功能强大,因此在各个领域的科研中都有广泛的应用^[8-10]。这些软件中的任何一种都可以实现电力系统问题的分析,然而 Matlab 因其面向矩阵的编程特性、完善的图形处理功能以及图形仿真界面(Simulink)而成为最适合电力系统仿真的数学工具。时至今日,经过 MathWorks 公司的不断完善,Matlab 已经发展成为适合多学科、多种工作平台的功能强大的大型软件。在设计、研究单位和工业部门,Matlab 被广泛用于科学研究和解决各种具体问题。

随着 Matlab 的不断发展进步,涌现出了一系列基于 Matlab 的电力系统分析软件包,例如:PST(Power System Toolbox),MatPower, VST (Voltage Stability Toolbox), MatEMTP, SPS (Sim Power System), PAT (Power Analysis Toolbox)^[11-13],这些软件包各有功能上的偏重点,而这里介绍的电力系统分析软件包 PSAT(Power System Analysis Toolbox)则包含了:PF-潮流计算;CPF-连续潮流;OPF-最优潮流;SSSA-小扰动分析;TDS-时域仿真;GUI-用户人机界面;GNE-自定义模型等功能^①。经过验证,该工具包已经可以计算上千节点规模的系统。而且该软件包源代码完全公开,因此用户可以根据自己的研究兴趣编写修改相应源代码实现研究目的。同时,依托于 Matlab 的强大计算功能以及丰富的控制、信号处理、鲁棒控制、模糊控制等工具箱,使得 PSAT 可以把控制科学、信号处理等方面的新思想与电力系统的传统仿真计算有机地结合起来。

文中首先介绍了 PSAT 几个主要的功能模块,然后就典型的 3 机 9 节点系统与商业软件 PSS/E 进行了仿真计算比较。结果证明,PSAT 不失为一种电力系统科学研究的有力工具。

1 主要功能模块介绍

1.1 系统模型库及主界面

为了适应针对电力系统新元件、新问题的研究,PSAT 提供了丰富的静态、动态模型库,主要包括:

a. 潮流模型,母线、传输线、变压器、平衡母线、PV 母线、恒功率负荷以及并联电容器等;

- b. 电力市场相关模型,供求上下限、储备功率等;
- c. 断路器相关模型,故障类型、开关等;
- d. 测量元件模型,测频器、相量测量单元 PMU 等;
- e. 电机模型,同步、异步电机;
- f. 负荷模型(ZIP),电压、频率相关模型等;
- g. 控制器模型,调速器、励磁,电力系统稳定器 PSS 及附加阻尼控制(POD);
- h. 柔性交流输电技术(FACTS)模型,静止无功补偿器(SVC)、可控串联补偿装置(TCSC)、静止同步串联补偿器(SSSC)、统一潮流控制器(UPFC);
- i. 直流输电模型;
- j. 分布式发电系统,各种风机模型。

同时,PSAT 提供了灵活的用户自定义功能,通过建立相应的状态方程编写相关的 Matlab 源代码就可以将模型加入到仿真过程中。

模型数据的输入有 2 种主要方式:其一纯文本格式输入(*.m 文件),按照规定格式编辑相关文件即可;或者,作为更直观的方法,PSAT 具有基于 Simulink 界面的模型库,支持在 Simulink 环境下从模型库中拖拽元件搭建仿真算例(*.mdl 文件)。但是,需要指出的是 PSAT 的基本计算还是基于 Matlab 的,Simulink 环境下编译的文件最终是解释成第 1 种方式的文本文件由 Matlab 函数完成计算,这与一些基于 Simulink 的电力系统工具包是不同的。

在计算中,PSAT 是面向元件建模的,它的每一个元件都可用下式所示的微分代数方程表示:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i, \mathbf{p}_i) \\ \mathbf{P}_i &= \mathbf{g}_{P_i}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i, \mathbf{p}_i) \\ \mathbf{Q}_i &= \mathbf{g}_{Q_i}(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i, \mathbf{p}_i) \end{aligned} \quad (1)$$

式中 $\mathbf{P}_i, \mathbf{Q}_i$ 为有功、无功; \mathbf{x}_i 为状态变量; \mathbf{y}_i 为代数变量; \mathbf{p}_i 为模型相关参数; \mathbf{f}_i 是描述模型动态的微分方程; $\mathbf{g}_{P_i}, \mathbf{g}_{Q_i}$ 是描述模型的代数方程。

在各种静态和动态仿真计算中,方程(1)以及基于其形成的 Jacobian 矩阵由一个内核函数统一求解,该函数也是整个 PSAT 的核心所在。

PSAT 的主界面与普通的 Matlab GUI 相似,也由菜单栏、状态栏、控件栏等组成。计算算例的潮流数据可以从主界面上的 Data file 文本框输入,而算例的动态文件可以从 Perturbation file 文本框输入。在其下的是 Command line 负责输入逐条命令。在主界面的右端依次显示本次算例的频率基值、容量基值、仿真开始时间、结束时间及潮流计算的收敛门槛等。在主界面的左下方是实时结果输出界面,在主界面的右下方是各种基本操作按钮(潮流计算、连续潮流、最优潮流、动态仿真及作图等)。

1.2 潮流计算

潮流计算是进行各种电力系统问题研究的基础,PSAT 包括了标准牛顿-拉夫逊算法、快速解耦算法等。求解潮流问题时,实际上就是令式(1)中的各

状态量为 0,于是得到下面所示的代数方程组:

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i &= \mathbf{f}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i, \mathbf{p}_i) \\ 0 &= \mathbf{g}_i(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i, \mathbf{p}_i) \end{aligned} \quad (2)$$

PSAT 具有友好的潮流计算界面,在装载算例(*.mdl 或 *.m)文件后,选择 power flow 完成潮流计算后可以弹出潮流计算 GUI。其中,清楚地列出了母线电压相角、有功、无功等潮流结果。同时,PSAT 还支持将潮流结果以文本格式输出,这样的潮流结果可以方便地应用于任何软件编写的电力系统分析软件的输入。

潮流计算 GUI 的上方显示的是本算例的母线编号、电压幅值、电压功角以及母线上的有功、无功。潮流结果显示一目了然,同时还支持有名值和标么值间的切换。

在潮流计算界面的下方显示了模拟本算例时电力系统各个元件(发电机、励磁系统等)的状态变量及仿真中间变量的值。由此可以方便地检查动态仿真及小扰动线性化分析得出结果是否正确、合理。

1.3 最优潮流

随着电力市场在国内的逐步施行,相关的一系列问题也正成为研究的热点,最优潮流问题是其中的一个基本问题。PSAT 采用基于 Mehrotra 预测-修改的内点法求解最优潮流问题,并且 PSAT 最优潮流中的目标函数是比较丰富的。基本的市场环境下的最优潮流模型为

$$\begin{aligned} \text{Minimize}_{(y,p)} \quad & F(p) \\ & g(y,p) = 0 \\ \text{subject to} \quad & h_{\min} \leq h(y) \leq h_{\max} \\ & p_{\min} \leq p \leq p_{\max} \end{aligned} \quad (3)$$

式中 函数 g, y 的定义同式(1); p 是表征市场供求的参数; F 为优化目标函数; h 为不等式约束。

1.4 小信号分析

低频振荡正成为跨大区输电安全性的瓶颈,针对这一问题的研究已广泛展开。在完成基本的潮流计算后,PSAT 便可以进行特征值参与因子等计算工作。它采用解析法计算 Jacobian 矩阵,这样就保证了计算的精确性。通过对式(1)进行线性化可以得到待研究系统 Jacobian 矩阵:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{\mathbf{x}} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{F}_x & \mathbf{F}_y \\ \mathbf{G}_x & \mathbf{J}_{LFV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} = [\mathbf{A}_c] \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{x} \\ \Delta \mathbf{y} \end{bmatrix} \quad (4)$$

这里 $\mathbf{F}_x = \nabla_x f, \mathbf{F}_y = \nabla_y f, \mathbf{G}_x = \nabla_x g, \mathbf{J}_{LFV} = \nabla_x g$ 。假设矩阵 \mathbf{J}_{LFV} 为非奇异的,则可以得到状态方程的 \mathbf{A} 阵

$$\mathbf{A} = \mathbf{F}_x - \mathbf{F}_y \mathbf{J}_{LFV}^{-1} \mathbf{G}_x \quad (5)$$

当所研究的算例比较复杂,为一个高阶系统时,PSAT 支持仅计算最大或最小的矩阵特征值,这一点对于工程实际十分有益。另外,PSAT 通过计算矩阵 \mathbf{A} 的左特征相量和右特征相量进而求解各模态下各状态量的参与因子。

1.5 时域仿真分析

由于电力系统是一个复杂的高维非线性系统,

因此非线性时域仿真往往是最可信赖的分析手段, PSAT 也提供了完善的时域仿真功能, 改进欧拉法以及梯形隐式积分法是其进行数值积分的 2 种可供选择的方法。需要指出的是: 仿真过程中故障的处理方法, PSAT 采用修改系统参数(例如支路阻抗数值大小)以及其专有的嵌入式的故障描述文件(*.m)来构成。

2 算例验证

计算结果的准确性是检验仿真软件的重要标准, 为此采用商业软件 PSS/E 就同一个算例与 PSAT 比较计算结果。采用 WSCC 3 机 9 节点算例, 这一系统虽然比较简单, 但是足以用来研究电力系统的小信号稳定性及动态特性。

系统的结构如图 1 所示, 其具体参数见文献[14]。

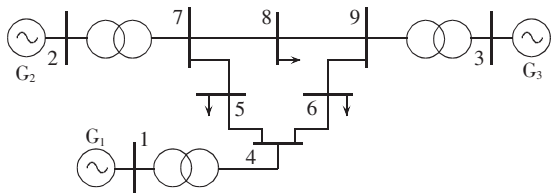


图1 WSCC 9 节点系统
Fig.1 WSCC 9-bus system

2.1 时域仿真比较

利用两软件对图 2 系统进行非线性时域仿真, 故障选为母线 7, 三相短路故障 0.083 s, 母线 1 电压如图 2 所示, 3 号发电机的转速偏差如图 3 所示。

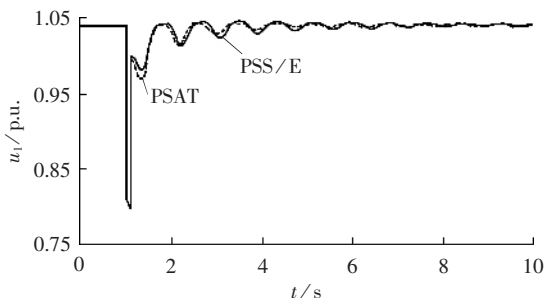


图2 母线 1 电压响应
Fig.2 Voltage response curve of bus 1

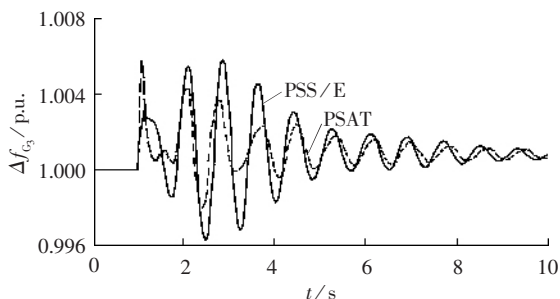


图3 发电机 G₃ 频率响应
Fig.3 Frequency response curve of G₃

比较图 2、3 可见, PSAT 和 PSS/E 时域仿真结果十分接近, 微小的偏差是由于两者采用的发电机模型稍有不同, 然而这些误差在允许范围之内。

2.2 小信号分析比较

PSAT 与 PSS/E 都有小信号分析功能模块, 所不同的是: PSAT 采用解析法计算状态空间矩阵以及特征值, 而 PSS/E 采用数值法计算特征值^①。针对同一算例计算, 把关心的阻尼不足的 2 个主要模式比较结果列于表 1。

表 1 小信号分析结果对比
Tab.1 Comparison of small signal analysis results

振荡模式	PSAT 结果	PSS/E 结果	
模式 1	实部	0.707 54	0.663 08
	虚部	11.606 60	8.280 80
	阻尼/%	6.08	7.90
	频率/Hz	1.847 20	1.318 00
模式 2	实部	0.186 47	0.310 71
	虚部	7.632 40	7.048 40
	频率/Hz	1.214 70	1.121 80

从表 1 的结果可见, 虽然两者由于算法原理上的不同, 小信号分析的结果具有一定的差异, 但是 PSAT 准确地捕捉了弱阻尼(<10%)的振荡模式, 这一点在实用中是很可贵的。

3 结论

随着我国电力工业的发展, 各种新装备新问题亟需解决。基于 Matlab 的电力系统分析工具包 PSAT, 因其丰富的元件模型库、完善的仿真功能以及源代码开放和灵活的自定义功能而成为电力科研人员一个理想的选择。对 PSAT 主要数据结构以及功能模块作了简介, 通过与商业软件 PSS/E 就同一算例的分析比较证明了该软件的适用性。世界范围内已有数目可观的国家地区的电力系统科研人员采用这一工具包, 更多的相关信息可见其主体网站: <http://www.power.uwaterloo.ca/~fmlano/>。

参考文献:

- [1] 桂林, 王维俭, 孙宇光, 等. 计及故障发生几率的发电机主保护定量化设计[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(6): 1-4.
GUI Lin, WANG Wei-jian, SUN Yu-guang, et al. Quantitative design of main protection scheme for hydro-generators considering occurrence probability of internal faults [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(6): 1-4.
- [2] 郑劲, 聂定珍. 换流站滤波器断路器暂态恢复电压的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(11): 57-59.
ZHENG Jin, NIE Ding-zhen. Study on Transient Recovery Voltage (TRV) of filter DC breaker in HVDC converter station [J]. High Voltage Engineering, 2004, 30(11): 57-59.
- [3] 李承, 邹云屏, 范婕. 动态电压恢复器单周控制策略的建模与仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(4): 7-10.
LI Cheng, ZOU Yun-ping, FAN Jie. Modeling and simulation of single-phase DVR based on one-cycle control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(4): 7-10.

① Power Technologies Inc. PSS/E application manual and operation manual, PSS/E brochure, 2001.

- [4] 顿敦,许先华,吴兆国. 电力稳定控制系统低频低压减载的最优策略实现[J]. 电力自动化设备,2006,26(4):28-31.
DUN Dun,XU Xian-hua,WU Zhao-guo. Realization of optimal strategy for power system low-frequency and low voltage load reduction[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(4):28-31.
- [5] 杨晓静,赵书强,马燕峰. 采用广域测量信号的 PSS 参数优化设计[J]. 电力自动化设备,2006,26(3):47-50.
YANG Xiao-jing,ZHAO Shu-qiang,MA Yan-feng. Parameter optimization for power system stabilizer with wide area measurement signals[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(3):47-50.
- [6] 陶礼学,姚钢,周荔丹,等. 基于 IGBT 的 ± 10 kvar STATCOM 装置设计[J]. 电力自动化设备,2006,26(5):61-65.
TAO Li-xue,YAO Gang,ZHOU Li-dan,et al. Design of ± 10 kvar STATCOM based on IGBT [J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(5):61-65.
- [7] 邹江峰,刘涤尘,潘晓杰,等. 电力系统低频振荡故障模式的研究与分析[J]. 高电压技术,2005,31(7):45-47.
ZOU Jiang-feng,LIU Di-chen,PAN Xiao-jie,et al. Malfunction analysis and research of power system low frequency oscillation [J]. High Voltage Engineering,2005,31(7):45-47.
- [8] 韩笑,徐曦,陈卓平. 基于 Matlab 与 VB 数据交换的继电保护仿真[J]. 电力自动化设备,2006,26(5):92-95.
HAN Xiao,XU Xi,CHEN Zhuo-ping. Protection simulation based on data exchange between Matlab and VB[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(5):92-95.
- [9] 刘艳萍,李志军,杨梅. 利用 Matlab 优化电力系统稳定器[J]. 高电压技术,2004,30(6):61-63.
LIU Yan-ping,LI Zhi-jun,YANG Mei. Optimization of power system stabilizer through Matlab[J]. High Voltage Engineering,2004,30(6):61-63.
- [10] 杜志叶,阮江军,王伟刚. 应用 Matlab/Simulink 仿真研究铁磁谐振[J]. 高电压技术,2004,30(9):32-34,42.
DU Zhi-ye,RUAN Jiang-jun,WANG Wei-gang. Research of ferroresonance simulation using Matlab/Simulink[J]. High Voltage Engineering,2004,30(9):32-34,42.
- [11] CHEN A H L,NWANKPA C O,KWATNY H G,et al. Voltage stability toolbox:an introduction and implementation [C]//Proc of 28th North American Power Symposium. Cambridge,Massachusetts:MIT,1996:707-712.
- [12] MAHSEREDJIAN J,ALVARADO F. Creating an electromagnetic transient program in Matlab:MatEMTP[J]. IEEE Trans Power Delivery,1997,12(1):380-388.
- [13] SCHODER K,HASANOVIC A,FELIACHI A,et al. PAT:a power analysis toolbox for Matlab/Simulink [J]. IEEE Trans Power Syst,2003,18(1):42-47.
- [14] ANDERSON P M,FOUAD A A. Power system control and stability[M]. Iowa State:Iowa State University Press,1977.
(责任编辑:柏英武)

作者简介:

常勇(1979-),男,湖北武汉人,博士研究生,主要研究方向为交直流电力系统动态分析以及广域测控系统(E-mail:longbrave@126.com);

徐政(1962-),男,浙江海宁人,教授,博士研究生导师,主要研究领域为直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、电力市场及其技术支持系统等;

王超(1981-),男,山东博兴人,博士研究生,主要从事电网安全稳定运行方面的研究。

Matlab-based power system analysis toolbox and its validity check

CHANG Yong,XU Zheng,WANG Chao

(Electrical Engineering Department,Zhejiang University,
Hangzhou 310027,China)

Abstract: The PSAT(Power System Analysis Toolbox) is introduced,which is programmed using Matlab math language,and the features of its open source code are detailed. The model library of PSAT includes generator,regulators,power system stabilizer,FACTS(Flexible AC Transmission System),HVDC(High Voltage DC transmission system),distributed power generation system,etc.. It has the functions of power flow calculation,continuation power flow calculation,optimal power flow calculation,small signal stability analysis,time domain simulation,phasor measurement unit allocation,etc.. Both time domain simulation of PSAT and eigenvalue analysis of PSS/E are applied to a typical example and the comparison of results shows that PSAT has a certain precision.

This project is supported by the National Natural Science Foundation of China(50277034).

Key words: Matlab; PSAT; power system modeling; dynamic simulation; PSS/E