

Matlab 模型接入 PSASP 暂态稳定计算模块的方法

李亚楼, 吴中习

(中国电力科学研究院, 北京市 海淀区 100192)

An Approach to Interface Matlab Model with PSASP Transient Stability Module

LI Ya-lou, WU Zhong-xi

(China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

ABSTRACT: Using the automatic source code generation function of Real-Time Workshop (RTW) module in Matlab and referring to implementation method of user-defined model and user program interface in Power System Analysis Software Package (PSASP), an approach to interface the model built in Matlab Simulink environment with PSASP transient stability module is proposed and realized by PSASP ver.7.0. By means of configuring RTW source code generation, compiling process, and developing corresponding interface program, the mathematical model built in Matlab Simulink environment can be converted into dynamic link library (DLL) automatically. According to the features of Matlab simulation, the process and manner of calling Matlab based model in PSASP transient stability module are researched, and the method to deal with the difference in initial value calculation of state variables and integration algorithm between Matlab and PSASP is put forward, while corresponding interfacing program is developed. Case study results show that under Matlab based model and user-defined model in PSASP the calculation results by these two methods are basically the same, thus the correctness of the proposed approach is verified. Using the proposed approach, the simulation by interfacing Matlab based model with PSASP is implemented, so a new measure to calculate the transient stability of new components and controllers for power grids is offered.

KEY WORDS: Matlab; power system analysis software package (PSASP); transient stability module

摘要: 应用 Matlab 中实时工具包(real-time workshop, RTW) 模块的代码自动生成功能, 借鉴电力系统分析综合程序(power system analysis software package, PSASP)用户自定义和用户程序接口的实现方法, 提出了一种将 Matlab Simulink 环境中搭建的模型接入 PSASP 暂态稳定计算模块的方法, 并在 PSASP7.0 版本中予以实现。通过配置 RTW 代码生成、编译过程, 并开发相应的接口程序, 可把 Matlab Simulink

环境中搭建的数学模型自动转换为动态链接库。根据 Matlab 仿真计算的特点, 研究了 Matlab 模型在 PSASP 暂态稳定计算模块中调用的流程和方式, 提出了两者在状态变量初值计算、积分算法上差异的处理方法, 并开发了相应的接口程序。计算结果表明, 采用相同功能的 Matlab 模型和 PSASP 用户自定义模型, 两者暂态稳定计算结果基本一致, 验证了文中所提方法的正确性。文中方法实现了 Matlab 模型接入 PSASP 进行仿真计算, 这为电力系统新型元件和控制装置暂态稳定计算提供了新手段。

关键词: Matlab; 电力系统分析综合程序(PSASP); 暂态稳定计算模块

0 引言

电力系统暂态稳定是指电力系统受到大干扰后, 各同步发电机保持同步运行并过渡到新的或恢复到原来稳态运行方式的能力^[1]。暂态稳定计算是分析电力系统的有效手段, 在系统设计、规划、运行和调度等方面有广泛的应用。目前, 国内主要采用电力系统分析综合程序(power system analysis software package, PSASP)、BPA 等商用软件进行大规模电网的暂态稳定计算。Matlab 软件因其灵活、方便性在小型电力系统的研究中得到广泛应用^[2-7]。

Matlab 软件功能丰富, 利用其中的 Simulink 模块可以搭建多种动态元件的数字模型。针对电力系统仿真计算, Matlab 软件提供了仿真模块(power system block), 其中包含电网中常见设备的模型, 如电源、线路、电动机、电力电子元件等。通过这些模块可以方便地建立电力系统元件模型, 进行仿真计算^[8]。Matlab 仿真计算的速度相对较慢, 不适用于大规模电网的暂态稳定计算。

PSASP 是中国电力科学研究院开发的一套功能强大、使用方便的电力系统分析工具。它是高

度集成开放、具有我国自主知识产权的大型软件包。PSASP 基于电网基础数据库、固定模型库以及用户自定义模型库的支持,可进行电力系统(输电、供电和配电系统)的各种计算分析。PSASP 设计了功能强大的用户自定义(user defined, UD)建模方法和用户程序接口(user program interface, UPI)。PSASP 成为了通过自行建模或编写程序来研究电力系统新设备、新装置的得力工具。国内多所大学和科研单位应用 PSASP 的 UD 和 UPI 功能做了大量的研究工作^[10-15]。

通过研究 Matlab 中实时工具包(real-time workshop, RTW)模块的代码自动生成功能、以及 PSASP 的 UD 和 UPI 的实现方法,可将 Matlab Simulink 环境中搭建的模型接入 PSASP 暂态稳定计算模块进行联合仿真,以综合利用 Matlab 丰富的建模功能和 PSASP 强大的电网分析功能,为电力系统新型元件和控制装置的暂态稳定分析计算提供新手段。通过配置 RTW 代码生成、编译过程,并开发相应的接口程序,可把 Matlab Simulink 环境下搭建的数学模型自动转换为动态链接库。本文根据 PSASP 暂态稳定计算的特点,研究了 Matlab 模型动态库在 PSASP 暂态稳定计算模块中调用的流程和方式,提出了两者在状态变量初值计算、积分算法上差异的处理方法,并开发了相应的接口程序。通过与 PSASP 用户自定义模型的仿真结果对比来验证本文接口方法的正确性。

1 Matlab、Simulink 和 RTW

Matlab 是由美国 Mathworks 公司开发的大型商用软件,是一个高效的科学计算工具软件。Matlab 集成了计算、可视化、程序设计功能,提供了一种非常容易使用的交互式工作环境,可以用于数学计算、算法验证、建模与仿真、数据分析、可视化等多个方面。

Simulink 作为 Matlab 的一个重要功能模块,提供了丰富的功能模型和易用的图形界面。它可以搭建各种动态元件模型进行仿真计算,已经在科研、生产中得到广泛应用。Simulink 提供了多种显式积分算法供用户选择,如一阶欧拉法、四阶龙格库塔法等。在 Simulink 环境中,以传递函数方式搭建仿真模型,模型状态变量需从零值开始仿真过程^[8]。

Matlab 的 RTW 模块具备 C 代码生成功能,可以将 Simulink 中搭建的模型生成为所需的代码。在

编译连接后,RTW 模块所生成的代码可以脱离 Matlab 运行环境,运行速度很快。RTW 模块提供了几种典型的代码生成模式,并支持用户定制模型生成的方式,以控制代码编译连接的过程,从而提供了一种与其它仿真软件接口的途径。

2 利用 PSASP 进行暂态稳定计算

利用 PSASP 进行电力系统暂态稳定计算的目的在于确定系统受到大干扰(如发生短路故障、负荷瞬间发生较大的突变、切除大容量的发电、输电或变电设备等)以后,系统各发电机组能否维持同步运行;分析影响电力系统暂态稳定的各种因素;并在此基础上研究提高电力系统暂态稳定性的措施^[1]。另外,在系统发生稳定性破坏事故以后,往往需要通过暂态稳定计算进行事故分析,找出稳定破坏的原因,并研究相应的对策。特别是随着大容量远距离输电和大电网互联的发展趋势以及新型元件的投入运行,电力系统稳定问题的研究和计算成为了一个更加重要的课题。

利用 PSASP 进行暂态稳定计算的数学模型可分为以下 3 个部分:

1) 电网的数学模型

$$\mathbf{X} = \mathbf{F}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \quad (1)$$

其中: $\mathbf{F} = (f_1, f_2, \dots, f_n)^T$; $\mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T$ 为网络方程求解的变量。

2) 发电机、负荷等一次设备和二次自动装置的数学模型

$$\dot{\mathbf{Y}} = \mathbf{G}(\mathbf{X}, \mathbf{Y}) \quad (2)$$

其中: $\mathbf{G} = (g_1, g_2, \dots, g_n)^T$; $\mathbf{Y} = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$ 为微分方程求解的变量。

3) 扰动方式和稳定措施的模拟,如电网的简单故障或复杂故障及冲击负荷、快关汽门、切机、切负荷、切线路等。这些因素的作用结果是改变 \mathbf{X} 、 \mathbf{Y} 。

如前所述,暂态稳定控制的数学模型可归结为网络方程和微分方程的联立求解。PSASP 采用分步积分法求解暂态稳定计算问题,即根据求出的系统变量轨迹,分析和判断系统的稳定性。该方法可简述如下:暂态稳定计算从一个稳定的运行方式基础上开始,求解微分方程中状态变量在该运行方式下的初始值。在开始一个时段 t 的仿真计算后,采用梯形隐积分的迭代法求解微分方程,采用直接三角分解和迭代相结合的方法求解网络

方程，微分方程和网络方程两者交替迭代，直至收敛，最后完成该时段的求解。

3 Matlab 模型接入 PSASP 暂态稳定计算

3.1 Matlab 模型暂态稳定动态库的生成

Matlab 的 RTW 模块通过一组配置文件来控制模型的代码自动生成和编译过程，包括系统目标文件(system target file)、Makefile 模板文件、模型主程序等^[8]，其中的系统目标文件用于生成控制代码，模型主程序将调用生成的模型代码完成仿真计算过程，Makefile 模板文件用于控制编译过程。Matlab 提供了几组缺省的配置文件供用户选择，并允许用户定制配置文件。在使用缺省配置时，RTW 模块将 Simulink 模型生成可执行的应用程序，其主要步骤包括：①按照系统目标文件配置，将 Simulink 中搭建的模型生成 C 代码，如 model.c、model.h 等文件；②按照模板生成定制的 Makefile 文件，如 model.mk；③执行 make 命令，将生成的代码与模型主程序联编，生成可执行程序。

为了将 Matlab 模型自动生成为暂态稳定计算可用的动态库，需要编写相应的 RTW 配置文件，并在搭建模型时遵从以下约定：

1) 在 Simulink 环境中搭建模型框图时，约定模型的输入、输出和打印信号分别与输入或输出端口相连，信号类型均为一维数组，并指定输入信号名称为 PSASPIN，输出信号名称为 PSASPOUT，打印信号名称为 PSASPPRN。

2) 通过 RTW 的选项配置设置求解器类型为固定步长，从 ode1~ode5 中选择一种积分算法，设定积分步长与 PSASP 暂态稳定计算相同。

在 Matlab 提供的缺省配置文件基础上，需要重新编写模型主程序和 Makefile 模板文件。在模型主程序中，需要按照 PSASP 暂态稳定计算要求定义接口函数，主要包括：

1) 初始化函数。在暂态稳定初始化时调用一次 PSASP，完成状态变量、输入量、输出量等变量和参数的初始化。为保证相同模型在电网的不同地方多次调用情况下，其模型信息不会相互覆盖，在初始化函数中动态申请变量的存储空间。

2) 模型仿真函数。在暂态稳定初始化及每时步的仿真计算时调用 PSASP，完成模型仿真计算功能，并与 PSASP 通过函数参数交换输入、输出变

量。将 PSASP 暂态稳定计算的输出连接至模型输入信号 PSASPIN，将模型的输出 PSASPOUT 输入到 PSASP 暂态稳定计算，并将模型打印数据 PSASPPRN 传递至 PSASP 处理。

3) 结束函数。PSASP 在结束暂态稳定计算时调用一次，完成状态变量、输入量、输出量等变量和参数存储空间的释放。

Makefile 模板文件中，需要设置合适的编译命令和编译参数，将模型代码、模型主程序编译链接为暂态稳定计算可用的动态库。

编写好 RTW 的配置文件，并将其安装到 Matlab 指定的目录下，就可以在 RTW 生成代码时选用。只要按照要求在 Simulink 中搭建好模型，配置好选项，就可以自动生成为 PSASP 暂态稳定计算可用的动态链接库，其主要过程如图 1 所示。

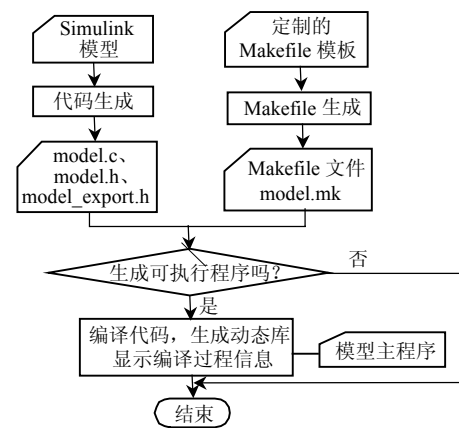


图 1 Simulink 模型生成模型动态库的流程图
Fig. 1 Flow chart of converting Simulink model into dynamic link library

3.2 Matlab 模型在暂态稳定计算中的调用

PSASP 和 Matlab Simulink 都能进行暂态稳定仿真计算，但两者存在以下不同，须在调用 Matlab 模型时进行处理。

1) PSASP 暂态稳定计算从一个稳定的基础潮流方式上开始仿真；在 Matlab Simulink 仿真中，其状态变量只能以零值启动。

2) PSASP 暂态稳定的积分算法采用梯形隐式积分算法；而 Matlab Simulink 仿真只提供显式积分算法。

为弥补 Matlab 模型零值启动计算的不足，在调用 Matlab 模型进行状态变量初值计算时，在接口程序中固定 Matlab 模型的输入变量数值不变，多次调用模型进行仿真，直至该模型的输出平稳，前后两

次输出的误差满足 PSASP 暂态稳定迭代精度的要求。通过这种方式,可以使 Matlab 模型中的状态变量达到与 PSASP 暂态稳定初值一致的平稳状态,基本满足暂态稳定仿真计算的要求。对于动态响应较慢、输出变化缓慢的模型,受迭代误差的限制,这种处理方式可能无法保证 Matlab 模型达到与潮流完全一致的稳定运行状态,对仿真计算的精度有一定影响。

在 PSASP 暂态稳定计算中增加 Matlab 模型调用后,新暂态稳定计算问题的数学模型如下:

$$\dot{X} = F(X, Y, U) \quad (3)$$

$$\dot{Y} = G(X, Y, U) \quad (4)$$

$$\dot{U} = H(X, Y, U) \quad (5)$$

其中: $H = (h_1, h_2, \dots, h_m)^T$ 为 Matlab 模型求解的程序方程组; $U = (u_1, u_2, \dots, u_m)^T$ 为 Matlab 模型方程求解的变量。

在上式中, PSASP 暂态稳定方程式(3)(4)和 Matlab 模型方程式(5)是联立求解的关系。

由于积分算法不同, PSASP 暂态稳定调用 Matlab 模型的方式和其固有模型、UD 模型、UPI 模型有区别,具体情况如下。Matlab 模型采用显式积分算法,不参与 PSASP 的隐式梯形积分迭代,其差分方程如下:

$$U_{t+1} = H(X_{t+1}^0, Y_{t+1}^0, U_t) \quad (6)$$

求解第 $t+1$ 时步的 Matlab 模型变量 U_{t+1} 时,将 $t+1$ 时步的网络方程变量 X_{t+1}^0 和微分仿真变量 Y_{t+1}^0 看作固定值。PSASP 计算暂态稳定微分方程仍然采用隐式梯形积分算法求解式(4)(5),其差分方程如下:

$$Y_{t+1}^{k+1} = G(X_{t+1}^k, Y_{t+1}^k, U_{t+1}) \quad (7)$$

$$X_{t+1}^{k+1} = F(X_{t+1}^k, Y_{t+1}^{k+1}, U_{t+1}) \quad (8)$$

在迭代求解式(7)(8)时,将 U_{t+1} 看作固定值,两式交替求解,直至迭代收敛为止,即完成一个时步的计算。设 k 为 PSASP 暂态稳定迭代计算的次数, PSASP 调用 Matlab 模型联合计算暂态稳定 $t+1$ 时步的过程如图 2 所示。

图中的 Matlab 模型可以是多个,执行完所有的 Matlab 模型计算后,再继续利用 PSASP 进行暂态稳定计算。

PSASP 与 Matlab 模型交换的输入输出变量类型和 UD 模型一致,仅在积分算法上有差别。因此使

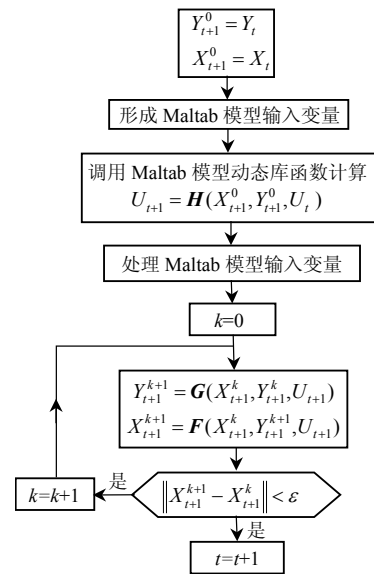


图 2 PSASP 调用 Matlab 模型联合计算暂态稳定一个时步的过程

Fig. 2 Process of one step transient stability computation while PSASP calling Matlab model

基于以上方法,在 PSASP 暂态稳定模块中开发了调用 Matlab 模型动态库的接口程序,实现了 Matlab 模型接入 PSASP 的联合暂态稳定计算。

4 测试

中国电力科学研究院 36 节点系统,如图 3 所示。分别接入同功能的 Matlab 模型与 UD 模型进行暂态稳定计算,对比计算结果。

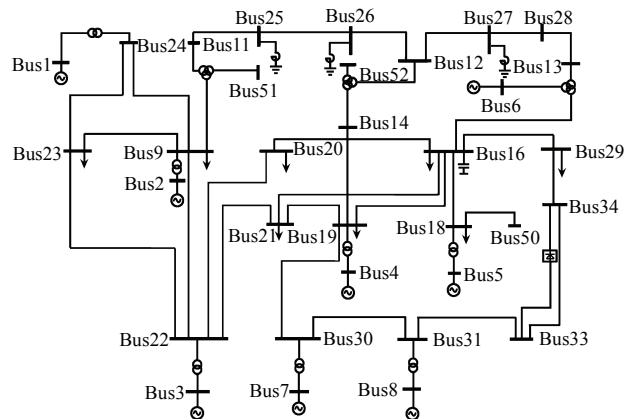


图 3 CEPRI 36 节点系统单线图

Fig. 3 Single-line diagram of CEPRI 36-node power network

用 PSASP 暂态稳定 UD 搭建的模型在理论上都可以用 Matlab 模型实现,两者的仿真结果基本一致。

测试中采用励磁调节器模型,其模型如图 4 所示。使用 PSASP 暂态稳定用户自定义功能,搭建该励磁调节器模型框图,如图 5 所示。

在 Matlab Simulink 环境下,按照与 PSASP 接

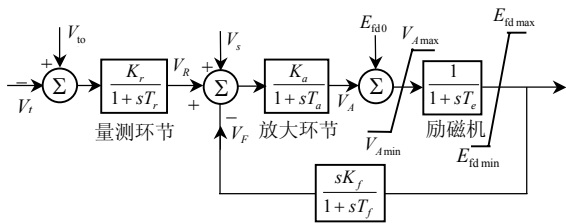


图 4 测试用励磁调节器模型框图
Fig. 4 Block diagram of automatic voltage regulator model

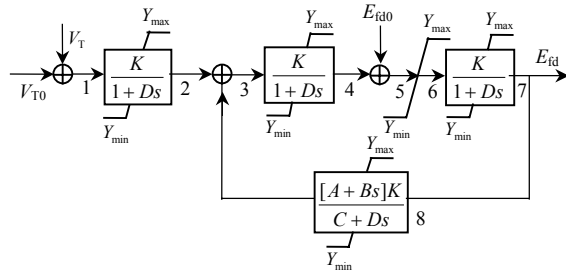


图 5 励磁调节器模型 PSASP 用户自定义框图
Fig. 5 PSASP user-defined block diagram of automatic voltage regulator model

口要求搭建该励磁调节器模型的功能框图，如图 6 所示。

图中，通过端口信号 PSASPIN 输入模型的 3

个输入量母线电压 V_t 和母线电压初值 V_{t0} 和励磁电压参考值 E_{fd0} 。经过模型计算，通过端口信号 PSASPOUT 输出发电机励磁电压 E_{fd} ，并通过端口信号 PSASPPRN 打印母线电压偏差、中间电压 V_A 和输出励磁电压。

在 Matlab 环境中进行 RTW 选项设置：求解器类型为固定步长，选择积分算法为 ode5，设定积分步长为 0.01 s(与 PSASP 暂态稳定步长相同)。选择使用 3.1 节编写的 RTW 配置文件，启动模型代码的自动生成过程，可将该 Matlab Simulink 模型生成成为 PSASP 暂态稳定计算可以使用的动态链接库。

使用 PSASP7.0 暂态稳定计算模块，在 3 台发电机 BUS4、BUS5、BUS6 上调用该励磁调节器模型的 UD 模型，仿真故障后 5 s 的系统暂态过程。网络故障为母线 BUS30 的瞬时三相短路接地故障，步长为 0.01 s。在这 3 台机上调用 Matlab 模型，其它参数和计算条件不变，再次进行暂态稳定计算，对比发电机 BUS4 的变量 E_{fd} ，2 次计算结果如图 7 所示。

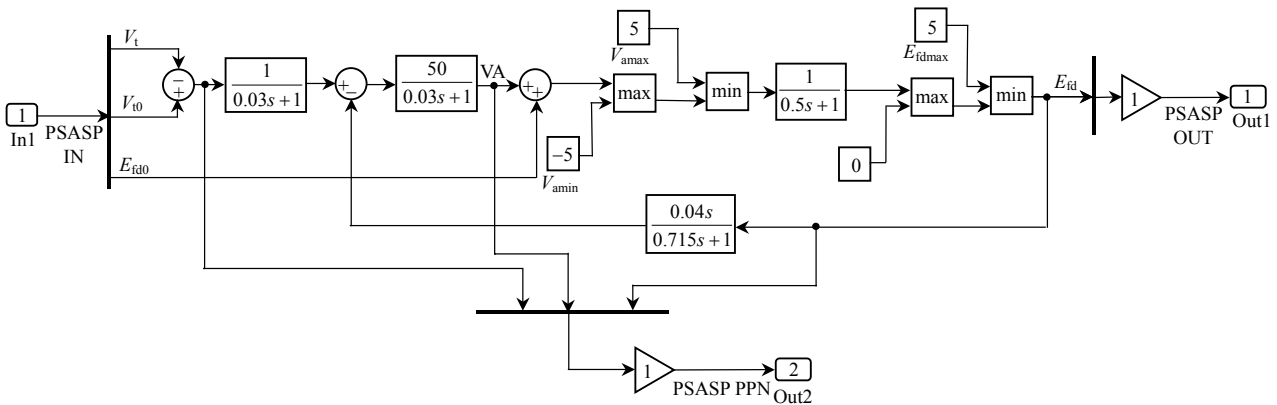


图 6 励磁调节器模型 Matlab Simulink 框图
Fig. 6 Matlab simulink block diagram of automatic voltage regulator model

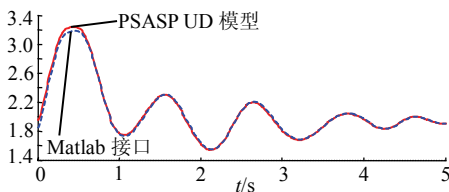


图 7 PSASP UD 模型与 Matlab 模型暂态稳定计算结果对比曲线

Fig. 7 Comparison of transient stability computing curves using PSASP UD model with that calling Matlab model

由仿真结果曲线可知，调用 PSASP UD 和 Matlab 模型进行暂态稳定计算的总体趋势一致，结

果基本相同。2 次计算出的变量初值 E_{fd} 有一定差别，这是由于 Matlab 模型仿真时状态变量从零值启动，满足迭代误差时仍然没有完全进入稳定状态导致。该算例的计算结果验证了本文 Matlab 模型接入 PSASP 暂态稳定联合计算方法的正确性。

5 结论

1) 通过合理配置 Matlab 的 RTW 功能，并开发相应的接口程序，可以将 Matlab 模型生成成为 PSASP 暂态稳定所需的模型动态库。模型动态库的运行不再依赖于 Matlab 运行环境，仿真计算速

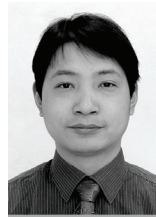
度很快。

2) 参考 PSASP UD 和 UPI 的实现方式, 可在暂态稳定计算过程中调用 Matlab 模型动态库, 实现 Matlab 模型接入 PSASP 进行联合暂态稳定计算。

3) PSASP 与 Matlab 模型交换的输入输出变量类型和 UD 模型一致, 处理方法基本相同。因此, 用 PSASP 中 UD 搭建的模型在理论上都可以使用 Matlab 模型实现。由于初值计算方法和积分算法上存在差异, 尽管两者的仿真结果不完全相同, 但总体趋势一致。

参考文献

- [1] 中国电力科学研究院. PSASP7.0 暂稳计算用户手册[Z]. 北京: 中国电力科学研究院, 2006.
- [2] 陈星莺, 刘孟觉, 单渊达. 超导储能单元在并网型风力发电系统的应用[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(12): 63-66.
Chen Xingying, Liu Mengjue, Shan Yuanda. Application of super conducting magnetic energy storage system-SMES in wind power system of network forming[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(12): 63-66(in Chinese).
- [3] 孟进, 马伟明, 刘德志, 等. 交流发电机整流系统传导电磁干扰的时域模型与仿真分析[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 75-79.
Meng Jin, Ma Weiming, Liu Dezhi, et al. Time domain model and simulation analysis of the conducted EMI for alternator-rectifier systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 75-79(in Chinese).
- [4] 鞠儒生, 陈宝贤, 邱晓刚. UPFC 控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 60-65,70.
Ju Rusheng, Chen Baoxian, Qiu Xiaogang. Basic control of unified power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 60-65,70(in Chinese).
- [5] 徐敏, 林辉. 同步发电机迭代学习励磁控制器的仿真研究[J]. 电网技术, 2005, 29(12): 81-84.
Xu Min, Lin Hui. Simulation of excitation controller of synchronous generator based on iterative learning control law[J]. Power System Technology, 2005, 29(12): 81-84(in Chinese).
- [6] 罗隆福, 李勇, 许加柱, 等. 基于自耦补偿与谐波屏蔽换流变压器的直流输电系统仿真研究[J]. 电网技术, 2007, 31(1): 32-36.
Luo Longfu, Li Yong, Xu Jiazhu, et al. Simulation study of DC transmission system based on auto-compensating and harmonics shading converting transformer[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 32-36 (in Chinese).
- [7] 谢小荣, 严干贵, 陈远华. 三电平 PWM 变频调速控制系统的 MATLAB 仿真平台[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 18-22.
Xie Xiaorong, Yan Gangui, Chen Yuanhua. Matlab simulation platform for three-level PWM variable-frequency speed-governing control system[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 18-22(in Chinese).
- [8] The Mathworks. User's manual of Matlab: Using Simulink Version [Z]. The Mathworks, 2000.
- [9] 孙建锋, 焦连伟, 吴俊玲, 等. 风电场发电机动态等值问题的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 58-61.
Sun Jianfeng, Jiao Lianwei, Wu Junling, et al. Research on multi-machine dynamic aggregation in wind farm[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 58-61(in Chinese).
- [10] 赵建军, 郭剑波, 周孝信. 利用附加节点注入电流法设计静止同步串联补偿器的潮流控制器[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(23): 1-6.
Zhao Jianjun, Guo Jianbo, Zhou Xiaoxin. Using the method of injecting current from additional nodes for modeling and simulation of SSSC power flow controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(23): 1-6(in Chinese).
- [11] 郑超, 周孝信. 基于普罗尼辨识的 VSC-HVDC 附加阻尼控制器设计[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 25-30.
Zheng Chao, Zhou Xiaoxin. Design of additional damping controller for VSC based HVDC transmission system by use of Prony identification method[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 25-30(in Chinese).
- [12] 张扬, 毛雪雁, 徐政. 用于电网稳态和暂态分析的统一潮流控制器模型[J]. 电网技术, 2002, 26(7): 30-33.
Zhang Yang, Mao Xueyan, Xu Zheng. UPFC models for power system steady-state and dynamic analysis[J]. Power System Technology, 2002, 26(7): 30-33 (in Chinese).
- [13] 刘前进, 黎雄, 孙元章. 基于 PSASP 程序的 FACTS 潮流建模[J]. 电网技术, 2000, 24(7): 6-9.
Liu Qianjin, Li Xiong, Sun Yuanzhang. Power flow modeling of FACTS based on PSASP[J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 6-9(in Chinese).
- [14] 张扬, 毛雪雁, 郭道丰. 用户自定义建模的励磁系统仿真和 PSS 设计[J]. 电网技术, 1998, 22(7): 14-18.
Zhang Yang, Mao Xueyan, Wu Daofeng. Exciting system simulation and PSS design by user defined modeling[J]. Power System Technology, 1998, 22(7): 14-18 (in Chinese).
- [15] 吴军, 吴中习. 最优潮流在 PSASP/UIP 环境下的研究和开发[J]. 电网技术, 1997, 21(2): 70-72,75.
Wu Jun, Wu Zhongxi. Research and programming of optimal power flow based on power system analysis software package with user program interface[J]. Power System Technology, 1997, 21(2): 70-72,75(in Chinese).



李亚楼

收稿日期: 2008-06-25.

作者简介:

李亚楼(1974—), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力系统数字仿真技术的研究和软件的开发,

E-mail: liyalou@epri.ac.cn;

吴中习(1941—2007), 女, 教授级高级工程师, 从事电力系统分析软件的研究和开发。

(编辑 王晔)