

DOI: 10.7667/PSPC150826

PSS/E 的自定义建模及其仿真研究

张东辉¹, 金小明¹, 周保荣¹, 陈宇川², 杨欢欢², 蔡泽祥², 朱林²

(1. 南方电网科学研究院, 广东 广州 510080; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 深入研究了 PSS/E 的自定义功能。详细介绍了 PSS/E 自定义的环境要求、格式要求、调用要求、基于等效电流注入的用户自定义建模的原理。分析了在 PSS/E 中利用协调调用模式来实现该类模型的方法和步骤。以静止无功补偿器(SVC)的自定义建模为例进行了建模研究, 并在自定义 SVC 模型中通过引入辅助信号以改善其性能。仿真结果充分表明了 PSS/E 自定义建模的可行性与可扩展性, 也验证了所建 SVC 模型的有效性, 为其他电力系统复杂设备在 PSS/E 中的自定义建模提供指导。

关键词: PSS/E; 用户自定义建模; SVC; 暂态仿真; 等效注入电流

User-defined modeling in PSS/E and its applicability in simulations

ZHANG Donghui¹, JIN Xiaoming¹, ZHOU Baorong¹, CHEN Yuchuan², YANG Huanhuan², CAI Zexiang², ZHU Lin²

(1. Electric Power Research Institute of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China;

2. School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A further research of the user-defined function in PSS/E is made. The requirements of environment, format and invocation of PSS/E's user-defined function, user-defined modeling principle based on equivalent current injection as well as its implementation method which utilizes the coordinated call models are introduced. And the research is exemplified by modeling a user-defined static var compensator (SVC) model. Then an auxiliary signal control is appended to the user-defined SVC to improve whose transient performance in dynamic simulation. Through the comparison of dynamic simulation results, the feasibility and expandability of the proposed user-defined SVC model is validated. The user-defined modeling method proposed can be a guidance for modeling other complicated devices in PSS/E.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51407079).

Key words: PSS/E; user-defined modeling; SVC; transient simulation; equivalent current injection

0 引言

随着技术的进步, 新型设备及控制策略等不断投入电力系统中。而用于电力系统运行分析的各类软件, 其自身所提供的标准模型库可能无法完全匹配仿真的实际需要。为解决该问题, 一方面依赖软件厂商对模型库的扩充与完善, 通过软件升级的方式增强可用性; 另一方面, 也可以通过引入标准化接口, 允许用户根据自身的研究对象, 通过特定的计算机语言编译标准模块供电力系统仿真分析软件调用, 即用户自定义功能, 满足仿真需求^[1-3]。

PSS/E 是在全球范围内获得广泛应用的电力系

统机电暂态仿真分析软件, 其主要功能包括潮流计算、短路计算与暂态稳定分析等^[4-7]。与 PSD-BPA 等同类型软件相比, PSS/E 一项突出的特点就是其强大、灵活的用户自定义功能。通过自定义功能, 用户能够建立自己需要研究的满足实际情况的模型并仿真验证, 可提高元件模型的复用性, 显著提升建模仿真工作效率。

国内外学者对 PSS/E 自定义功能的研究有一定进展。文献[8-13]针对 PSS/E 中励磁系统的自定义建模进行研究, 对 PSS/E 自定义模型的建立流程做了介绍。文献[14-17]对调速器和低频减载控制等进行了 PSS/E 自定义环境下的建模研究。但相关工作仅针对单一对象且涉及的模型偏于简单, 鲜有对 PSS/E 自定义功能的完整介绍, 更缺少对建模思路

与具体步骤的系统化梳理, 尤其是缺少对复杂对象的建模研究。

基于上述问题, 本文从自定义建模的环境要求、数据要求和流程管控、实施步骤等环节深入探讨了 PSS/E 的自定义功能。详细研究了在 PSS/E 中基于等效电流注入的自定义模型建模方法和步骤, 并以 SVC 为例搭建了自定义模型。同时, 在相应的自定义模型中还引入辅助信号用于改善其性能。与 PSS/E 的自带 SVC 模型进行了仿真对比, 仿真结果表明了 PSS/E 自定义建模的可行性、可扩展性以及模型的有效性。

1 PSS/E 的自定义建模功能研究

1.1 自定义建模的基础要求

(1) 环境要求

要使用 PSS/E 自定义建模功能, 必须配置相应的环境。以 V33 版 PSS/E 为例, 需要配置开发工具包 Visual Studio 2010 和计算机语言编译器 Inter Visual Fortran 2011。可以通过运行 PSS/E 安装路径下的 User Model Compile/Link and Environment Manager 程序来检验目前配置是否满足 PSS/E 自定义环境要求。

(2) 格式要求

对自定义模型进行编译前, 先用 PSS/E 动态 dyr 文件生成 CONEC、CONET 文件: 其中 CONEC 文件用于处理包含状态变量和微分方程数组的自定义模型, CONET 文件用于处理包含电流电压代数方程的模型。之后用 Fortran 语言在两个文件中编写自定义模型的源代码, 编译成 obj 文件和生成动态链接库文件 dsusr.dll。

(3) 调用要求

将生成的 dsusr.dll 需要放入 PSS/E 主程序目录下, 同时在 PSS/E 动态 dyr 文件中加入调用自定义模型的控制语句。

1.2 自定义建模的数据要求

PSS/E 模型中会包含各种参数变量和常量, 如放大倍数、时间常数、状态变量、输入及输出变量等。PSS/E 自定义模型需要对数据进行类型定义, 并以动态数组的形式贮存和归类管理。常见的数组及其功能如表 1 所示。

PSS/E 程序在执行自定义模型的数据流向时有明确要求: 首先从 CON 数组中获得自定义模型的常量参数, 其次从系统条件数组中获得当前运行条件, 再次从 STATE 数组中获得状态变量当前值传递给自定义模型子程序; 然后由模型子程序来计算各个状态变量的微分值; 最后将计算出来的每一状态变量的微分值放入到 DSTATE 数组中, 返回到主

程序进行积分计算^[9]。

表 1 PSS/E 自定义中的常用数组

数组	内容	索引
CON	常数	CON 数
ICON	常数	ICON 数
STATE	状态变量数组	STATE 数
VAR	代数变量数组	VAR 数
VOLT	母线标么电压值	母线的顺序编号
ECOMP	电压调节器补偿电压	发电机索引号
EFD	发电机主磁场电压	发电机索引号
DSTATE	一般状态变量对时间的导数	STATE 数
CURNT	网络求解的电流注入量	母线顺序号

PSS/E 程序内部通过 MODE 标志实现对数据流向的管控。MODE 赋值为 1~8 来代表不同的状态, 其含义如表 2 所示。对于暂态仿真, MODE 的 1~4 必不可少。自定义模型就是根据 MODE 的变化执行相应的任务编写对应的代码。

表 2 PSS/E 中每个 MODE 标记的功能

标志名称	值	意义
MODE	1	初始化所有状态变量
	2	计算所有状态变量对时间的导数
	3	计算输出并存至相应数组
	4	更新积分器数量
	5	列出模型信息 DOCU.
	6	列出模型信息 DYDA
	7	写模型文档 DOCU
	8	描述各常量代表的物理量

1.3 基于等效电流注入的自定义建模方法

根据研究对象的不同, PSS/E 下的建模方法会存在一定的差异。例如, 对发电机励磁系统而言, PSS/E 主程序可识别并直接调用励磁模型的输出数据, 即励磁电压数组 EFD。对于这类对象, 自定义建模的思路直接, 重点集中在考虑元件自身的结构是否合理, 控制逻辑关系是否全面完善等, 将输出数据存放在 PSS/E 内部已自带的数组中, PSS/E 主程序直接调用即可实现模型的功能。

还有一些对象, 如直流、FACTS 设备等, 其模型的输出数据无法为 PSS/E 主程序直接调用。例如, 在 PSS/E 模型库中, SVC 控制器的输出为并入母线的电纳值 B, 直流控制的输出是各个换流站的触发角 α 等信息, 这些输出数据在 PSS/E 程序内部并没有自带数组。因此, 针对该类对象, 本文介绍了一种在 PSS/E 下的等效电流注入的自定义建模方法。

元件通过母线实现和电力系统的连接。元件自

身对系统的影响是通过对其相连母线上的注入功率所体现。若与母线电压联立，可以进一步转化为注入电流的形式，如图 1 所示。PSS/E 程序可以识别并调用电流 CURNT 数组。

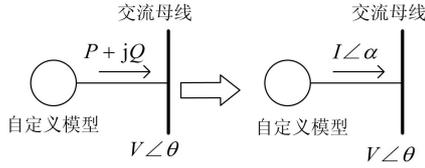


图 1 电流注入类自定义模型的实现

Fig. 1 Realization of injection current model

基于等效电流注入的自定义模型既需要承担解微分方程求解，又需要计算注入电流完成代数方程求解。PSS/E 提供了协调调用模式(Coordinated Call Models, CCM)用于来实现上述过程：将注入电流的计算以辅助函数的形式与 CONEC 自定义程序编写在同一个程序中，并要求该辅助函数的名称取用 CONEC 子函数名称且首字母要以 T 代替。

1.4 自定义模型的执行流程

自定义模型的执行流程可由 MODE 标志进行控制，如图 2 所示。

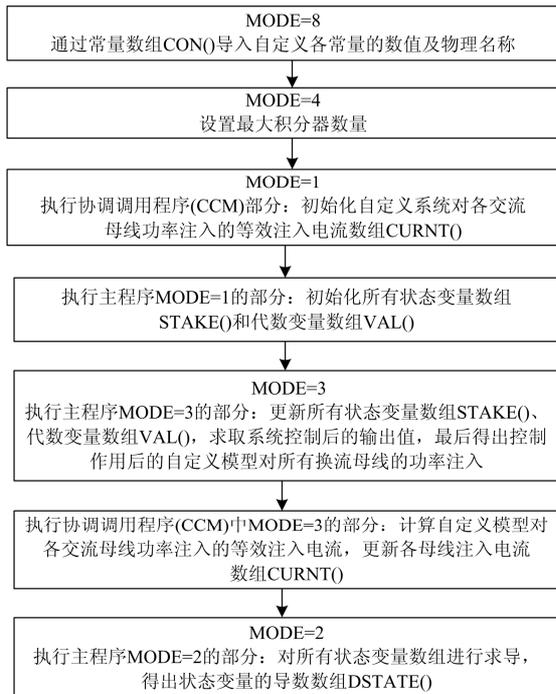


图 2 MODE 的执行流程

Fig. 2 Process order of MODE

第一次从 MODE=8 执行到 MODE=2 的过程为程序的初始化过程，此时 PSS/E 程序会遍历所有状

态变量，检查初始条件。然后在 MODE=2 在和 MODE=3 之间一直循环直至仿真结束。

2 PSS/E 下的 SVC 的自定义建模

2.1 SVC 建模分析

本节以 SVC 为例，研究电力系统元件在 PSS/E 中的自定义建模。

图 4 为 PSS/E 自带 SVC 模型 CSVGN5 的控制框图，输入为母线电压，输出为电纳 B_{SVC} 。由于 B_{SVC} 无法被 PSS/E 主程序直接调用，可将其按照上一节中的思路，以等效电流形式处理。

根据元件的控制框图,可以确定与该模型相关的代数变量、状态变量、输入与输出量，分别在 CON、STATE、VAR、ICON 数组中按规则分配空间。

对于控制框图，通常思路是将传递函数分解为一阶的形式，如图 3 所示。

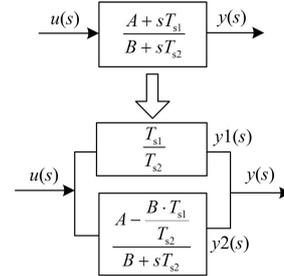


图 3 控制框图的拆分

Fig. 3 Decomposition of control block diagram

相应的时域微分方程为

$$\frac{dy_2(t)}{dt} = \frac{u(t)(A - B \frac{T_{s1}}{T_{s2}}) - B \cdot y_2(t)}{T_{s2}} \quad (1)$$

$$y_1(t) = u(t) \frac{T_{s1}}{T_{s2}} \quad (2)$$

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) \quad (3)$$

在自定义编程中，将 $y_2(t)$ 作为状态变量存于 STATE 数组中，其微分量存于 DSTATE 数组中。此外，PSS/E 程序中也提供了内部函数用于实现一阶惯性环节、超前滞后环节等，从而降低自定义难度。针对图 4 所示传递函数，可以直接调用函数“ $y(s)=LDLG_MODE()$ ”来实现。

2.2 SVC 的等效注入电流的处理

由于 SVC 的输出量为电纳 B_s 无法被 PSS/E 主程序直接调用，需要将其与母线电压联立转换成对应的等效注入电流。

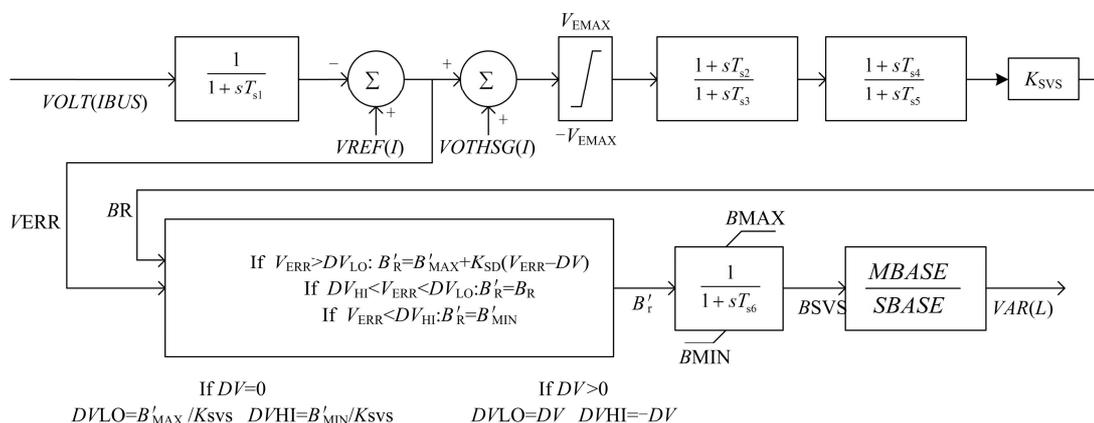


图 4 SVC 控制简图

Fig. 4 SVC control block diagram

当系统出现扰动时, SVC 需要改变其输出电纳来改变输出的无功量从而达到控制母线电压的效果, 即

$$\bar{I}_{n+1} = \bar{I}_n + SVC_Contribution \quad (4)$$

$$SVC_Contribution = ((jB \cdot \bar{V}^2) / \bar{V})^* \quad (5)$$

其中: \bar{I}_n 和 \bar{I}_{n+1} 分别为 $n+1$ 时刻, n 时刻的网络求解注入电流; $SVC_Contribution$ 是 SVC 注入母线的无功等效电流; B 是 $n+1$ 时刻 SVC 控制输出的电纳值; \bar{V} 是 $n+1$ 时刻 SVC 连接点的母线电压。自定义模型以此来实现网络求解电流的更新, 即将求解的注入电流值 \bar{I}_{n+1} 更新注入电流数组 $CURNT$ 。

3 实例仿真验证对比

通过上述自定义方法编写 PSS/E 自带 SVC 模型 CSVGN5, 模型参数的选取范围及其建议值如表 3 所示。

表 3 控制参数的取值范围和建议值

Table 3 Range and suggested values of the control parameters

取值范围	建议值	取值范围	建议值
$T_{S1} < 0.4$ s	0.02	$0 < K_{SD} < 1\ 000$	10
$V_{EMAX} < 0.3$ p.u.	0.22	$0 \leq B_{MAX} \leq 10$	10
$T_{S2} < 2$ s	1.8	$B'_{MAX} \leq B_{MAX}$	9
$0 < T_{S3} < 5$ s	0.3	$B_{MIN} > -2B_{MAX}$	-2.5
$T_{S4} < 2$ s	0	$B'_{MIN} \geq B_{MIN}$	-1.5
$T_{S5} < 5$ s	1	$2 \cdot DELT < T_{S6} \leq 0.2$	0.1
$50 \leq K_{SVS} < 1\ 000$	400	$D_V < 0.3$	0.3

1) 测试案例一

在图 5 所示的多机系统中, 在靠近负荷中心的母线 B202 上安装有进行无功补偿的固定电容器。选择在该处安装 SVC 进行对比。设置线路 L1 靠近

母线 B152 侧 2 s 发生三相金属性接地故障, 0.1 后切除故障线路。分别监测母线 B202、B152 的电压及 SVC 无功输出情况, 如图 6 所示。

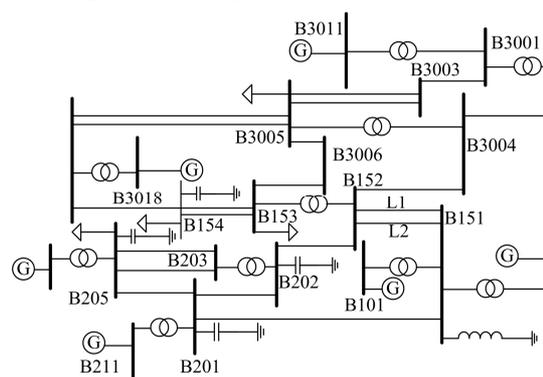
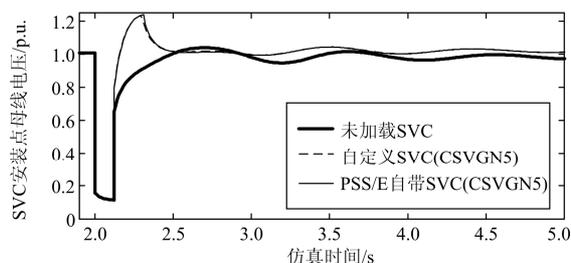
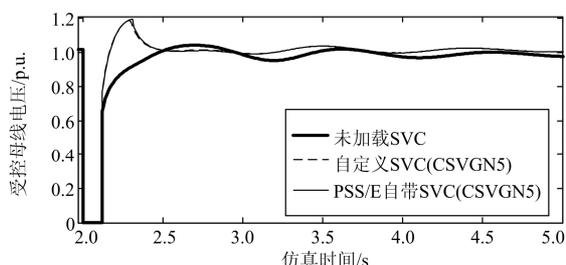


图 5 仿真测试系统

Fig. 5 Simulation testing system



(a) SVC 安装处(B202)电压曲线



(b) 受控母线(B152)电压曲线

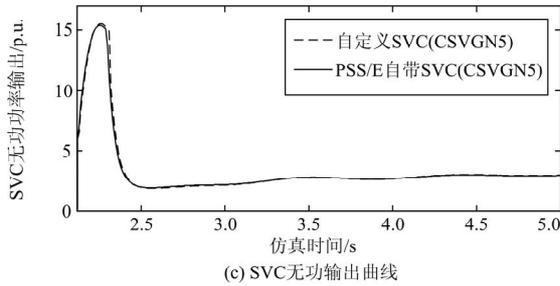


图 6 SVC 模型仿真结果对比

Fig. 6 Simulation results of SVCs

由图 6 可见，在配置 SVC 后母线 B202、B152 在恢复过程中电压波动幅度小，故障后 3 s 电压已趋于稳定。而采用安装电容器补偿的方式，母线 B202、B152 电压恢复较为缓慢。因此，相对于安装电容器补偿的方式，安装 SVC 更有助于控制节点电压水平。进一步检验比对自定义 SVC 模型与 PSS/E 自带模型的输出曲线，两者的初始值、振荡趋势、稳态值一样，曲线重合。这说明本文所介绍的建模方法与所搭建的 SVC 模型是正确的。

2)测试案例二

为改善 SVC 的性能，再次利用 PSS/E 的自定义功能在自定义模型中加入辅助信号，其控制框图如图 7 所示。选用母线 B152 电压为输入信号，故障场景设置与案例一相同，暂态仿真结果如图 8 所示。

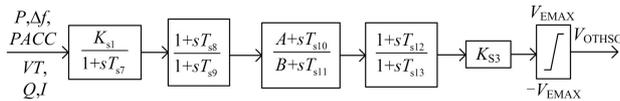
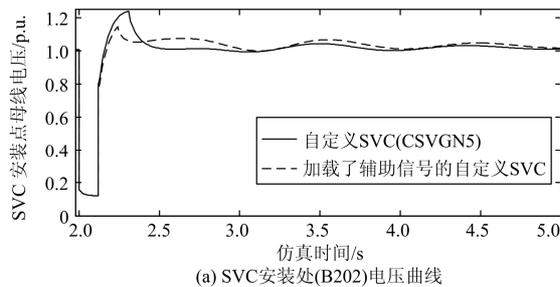
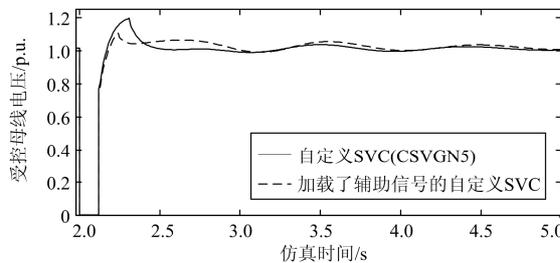


图 7 辅助信号的控制框图

Fig. 7 Control block diagram of auxiliary signal



(a) SVC安装处(B202)电压曲线



(b) 受控母线(B152)电压曲线

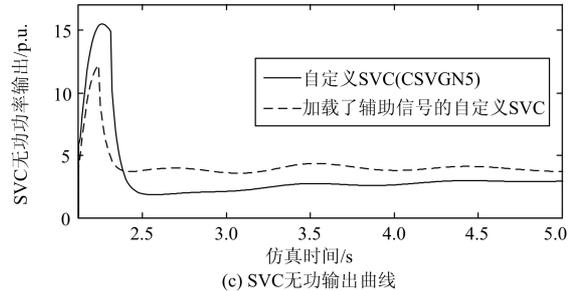


图 8 自定义 SVC 仿真结果对比

Fig. 8 Simulation results of the two user-defined SVCs

由图 8 得知，在自定义功能模型中引入辅助信号后，母线 B202、B152 在故障切除瞬时的冲击电压显著降低，恢复过程中电压波动更为平稳，有利于保护设备。

同时，在 Intel I5 CPU 4GB RAM 硬件环境及 PSS/E V33.04 软件环境下，对系统自带 SVC 模型、自定义 SVC 模型以及加载辅助信号的自定义 SVC 模型进行了运行效率检测。在上述案例中，三种模型的计算用时均为 0.6 s，内存增量约 0.4 MB。在南方电网某运行方式下的检测结果也有相同结论。PSS/E 自定义模型可完全用于大规模电力系统的仿真计算。

4 结论

本文深入研究了 PSS/E 的自定义功能，详细介绍了自定义建模的环境要求、数据要求和流程管控等核心环节，研究了在 PSS/E 中基于等效电流注入的自定义模型建模方法和步骤。以 SVC 为例搭建了自定义模型，并与 PSS/E 自带的 SVC 模型进行了对比，验证了本文所述 PSS/E 关于自定义建模方法的正确性。本文所做工作可为建立其他用户自定义模型提供指导，具备良好的参考价值。

参考文献

[1] 徐得超, 刘巍, 朱旭凯, 等. 含大量继保和安自装置的连锁故障并行仿真软件研发[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 132-138.
 XU Dechao, LIU Wei, ZHU Xukai, et al. Research and development of cascading failure simulating software containing many relaying protections and automatic safety devices[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 132-138.
 [2] 蔡云峰, 徐洋, 潘琪. 基于自定义模型的变压器纵差动保护 PSCAD 仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(3): 118-122.
 CAI Yunfeng, XU Yang, PAN Qi. PSCAD simulation of

- transformer longitudinal differential protection based on custom model[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(3): 118-122.
- [3] 丁茂生, 王辉, 舒兵成, 等. 含风电场的多直流送出电网电磁暂态仿真建模[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 63-70.
DING Maosheng, WANG Hui, SHU Bingcheng, et al. Electromagnetic transient simulation model of multi-send HVDC system with wind plants[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 63-70.
- [4] 徐蔚, 黄弘扬, 徐政. PSS/E 的直流模型及与 BPA 直流系统响应特性的比较[J]. 高压电器, 2013, 49(12): 116-122.
XU Wei, HUANG Hongyang, XU Zheng. Modelling HVDC systems in PSS/E and comparison of HVDC response characteristics in PSS/E and BPA[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(12): 116-122.
- [5] 程华, 徐政. PSASP 与 PSS/E 稳定计算的模型与结果比较[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 1-8.
CHENG Hua, XU Zheng. Comparison of mathematical models for transient stability calculation in PSASP and PSS/E and corresponding calculation results[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 1-8.
- [6] 李娜, 徐政. PSS/E 中风电机组的低电压穿越模拟方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(8): 23-29.
LI Na, XU Zheng. Simulation method of low voltage ride-through of wind generators in PSS/E[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(8): 23-29.
- [7] 方军. PSS/E 的发电机组励磁系统建模和电力系统分析[D]. 福州: 福州大学, 2004.
FANG Jun. Modeling of excitation system and analysis of power system with PSS/E[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2004.
- [8] 陈义宣, 王晓茹, 廖国栋, 等. PSS/E 励磁系统的自定义建模[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 78-83.
CHEN Yixuan, WANG Xiaoru, LIAO Guodong, et al. User defined excitation system models in PSS/E[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 78-83.
- [9] 骆玲, 文劲宇. PSS/E 用户自定义功能在励磁系统建模中的应用研究[J]. 电气应用, 2007, 26(8): 21-24.
LUO Ling, WEN Jingyu. Research on The application of PSS/E user-defined modeling technique for excitation system modeling[J]. Electrotechnical Application, 2007, 26(8): 21-24.
- [10] 钱叶牛, 董亚旭, 李国庆. 基于 FORTRAN 编程的 PSS/E 用户自定义励磁系统建模[J]. 东北电力大学学报, 2011, 31(4): 101-106.
QIAN Yeniu, DONG Yaxu, LI Guoqing. User defined excitation system models in PSS/E based on FORTRAN programming[J]. Journal of Northeast Dianli University, 2011, 31(4): 101-106.
- [11] 陆春良, 竺士章, 陈新琪. 发电机励磁系统实测建模与应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 73-75.
LU Chunliang, ZHU Shizhang, CHEN Xinqi. Measuring data based modeling and application of generator excitation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 73-75.
- [12] 丁傲, 谢欢, 刘平, 等. 发电机励磁调节器低励限制协调控制分析[J]. 电网技术, 2012, 36(8): 193-198.
DING Ao, XIE Huan, LIU Ping, et al. Analysis on coordinated control of under-excitation limiter of generator excitation regulator[J]. Power System Technology, 2012, 36(8): 193-198.
- [13] 张坤, 林俐, 李欣, 等. 基于 PSS/E 的调速器自定义模型设计[J]. 现代电力, 2011, 28(2): 12-16.
ZHANG Kun, LIN Li, LI Xin, et al. Design of user-defined speed governor model based on PSS/E[J]. Modern Electric Power, 2011, 28(2): 12-16.
- [14] 谢大鹏, 王晓茹, 张薇. 利用 PSS/E 实现电力系统低频减载控制仿真[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(1): 71-75.
XIE Dapeng, WANG Xiaoru, ZHANG Wei. Realization of power system under-frequency load shedding control simulation with PSS/E[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(1): 71-75.
- [15] 王武双, 向荣. PSS/E 自定义功能在电力系统暂态分析中的应用[J]. 电力学报, 2009, 24(5): 380-387.
WANG Wushuang, XIANG Rong. Application of user-defined technique of PSS/E in power system transient analysis[J]. Journal of Electric Power, 2009, 24(5): 380-387.
- [16] 王勇, 李峰, 潘玲玲, 等. 基于 PSS/E 潮流 API 接口的动态过程仿真系统[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 136-141.
WANG Yong, LI Feng, PAN Lingling, et al. Dynamic process simulation system based on power flow API of PSS/E[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 136-141.
- [17] 谢欢, 吴涛, 苏为民, 等. 基于 PSS/E 风电场静止无功补偿器仿真建模[J]. 中国电力, 2014, 47(2): 111-115.
XIE Huan, WU Tao, SU Weimin, et al. Study on modeling and simulation of SVCs in wind farms based on PSS/E software[J]. Electric Power, 2004, 47(2): 111-115.

收稿日期: 2015-05-17; 修回日期: 2015-09-22

作者简介:

张东辉(1984-), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统稳定分析、控制与规划;

朱林(1979-), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 主要研究方向为电力系统控制与自动化、直流输电技术。E-mail: zhul@scut.edu.cn

(编辑 葛艳娜)