

基于 PSS/E 潮流 API 接口的动态过程仿真系统

王勇, 李峰, 潘玲玲, 刘俊, 徐鹏

(中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 电力系统仿真分析软件 PSS/E 提供了丰富的 API 接口, 为应用程序的二次开发提供了便利。基于 PSS/E 的 Fortran API 接口设计实现了以 PSS/E 潮流计算为核心的动态过程仿真系统。通过对 API 接口的二次开发和封装, 建立潮流计算接口层, 实现对 PSS/E 潮流计算的控制。建立了用户自定义调速器模型, 将频率和调速器仿真结果通过接口层与 PSS/E 潮流进行交互, 实现系统的动态响应过程仿真。通过潮流计算前的不平衡功率动态预分配技术, 使扰动过程中联络线功率分配更加真实合理。通过 9 节点算例和华北实际电网模型对仿真系统进行验证, 仿真结果表明, 利用 PSS/E 的 API 接口进行二次开发能够满足大型应用程序对准确性和实时性的要求。

关键词: PSS/E; API; 潮流计算; 动态过程仿真系统; 不平衡功率动态预分配

Dynamic process simulation system based on power flow API of PSS/E

WANG Yong, LI Feng, PAN Ling-ling, LIU Jun, XU Peng

(China Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Power system simulation software PSS/E provides many interfaces to develop the application program. The dynamic process simulation system, with PSS/E power flow calculation as the core, is designed by Fortran API interface. First, the power flow calculation interface layer is achieved via API secondary developing and encapsulation to control the PSS/E power flow. Then a user-defined governor model is established, and frequency and governor simulation results interact with PSS/E power flow through the interface layer to achieve the dynamic process simulation. Dynamic predistribution technology of unbalance power during the simulation process is proposed, which makes the distribution of tie line power flow more reasonable during disturbance. Finally, the simulation results of IEEE 9-buses system and North China Power Grid verify that secondary development by PSS/E API interface can satisfy the requirements of real-time and high accuracy of large applications.

Key words: PSS/E; API; power flow calculation; dynamic process simulation system; dynamic predistribution technology of unbalance power

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)15-0136-06

0 引言

系统频率和区域联络线功率是自动发电控制 (AGC) 软件的主要数据基础和控制目标^[1-3]。控制策略的研究制定需要有仿真计算提供持续、准确的电网运行数据, 而对控制策略执行结果的仿真验证是保证电网安全运行必不可少的重要环节。

调度员培训仿真系统 (DTS)^[4-5]通常具备了 AGC 等高级应用软件的培训态模拟功能, 但其面向

于调度操作模拟, 对计算精确性要求不高, 且与调度系统深度集成, 使用固定的电网模型, 灵活性差。BPA、PSASP、PSS/E 等仿真分析软件的潮流计算准确性已得到广泛认可^[6-9], 但其应用主要是对给定的单断面进行分析计算, 且计算过程无法由用户进行控制, 交互性较差。虽然目前大多数仿真分析软件都提供了用户自定义接口 (UPI) 功能^[10-12], 但 UPI 通常是嵌入到分析软件的计算流程的某一固定环节中, 由分析软件进行对自定义模型的计算结果进行主动调用, 外部程序仍无法实现对计算流程的驱动和控制。在这些分析软件中, 除了 UPI 功能, PSS/E 还提供了强大的应用程序接口 (API), 用户程序通过对 API 接口的调用, 可以实现对 PSS/E 计

基金项目: 国家电网公司科技项目“调度自动化系统试验验证平台关键技术研究与应用”; 国家电网公司科技项目“‘源-网-荷’互动环境下电网稳态分析方法研究”

算结果和计算流程的控制。目前国内对于 PSS/E 接口二次开发方面的研究还相对较少, 文献[13]基于 PSS/E 的 Python 接口进行了电网孤立岛的判断和线路定步长等应用程序的开发。

本文利用 PSS/E 提供的 Fortran API 接口^[14], 对 PSS/E 的潮流计算进行扩展, 实现用户程序对 PSS/E 计算全过程的控制, 并通过 API 接口实现 PSS/E 与用户自定义调速器模型的交互, 实现电网长周期动态过程的模拟。提出了不平衡功率动态预分配方法, 改善了常规计算在系统扰动过程中不平衡功率堆积到平衡机, 造成潮流分布不合理的问题。最后用 9 节点系统和华北实际电网模型对仿真结果进行了验证。

1 电网模型管理

与 DTS 和常规仿真分析软件的固定电网模型不同, 面向应用程序提供数据仿真验证的仿真系统需要提供与被验证软件所处电网相一致的电网模型, 因此需要能灵活地从不同类型的模型描述文件进行电网模型和方式的解析、接入和管理。典型的模型描述文件包括 BPA 方式模型文件, 以及实际调度系统的导出的标准 CIM/E 物理模型文件。电网模型建立的步骤如下:

1) 根据输入的模型描述文件类型调用不同的电网模型适配器进行解析, 将模型导入仿真系统实时数据库中。仿真系统实时库中存放了设备的基本信息、潮流计算结果、电网的拓扑连接关系等。用户自定义建模等相关计算程序的数据都可以从仿真系统实时库中获取, 人机展示界面可以直接从实时数据库中获取数据并进行展示。

2) 调用 PSS/E 模型导出功能模块, 从仿真系统实时库中读取模型信息, 生成 PSS/E 潮流数据文件。

3) PSS/E 中是以设备所连母线和设备 ID 作为关键信息来定位设备的, 因此, 在导出 PSS/E 设备模型的同时, 同时建立起实时数据中设备关键字和 PSS/E 模型中设备 ID 的对应关系, 以便调用 PSS/E 接口时能快速定位设备。

2 基于 PSS/E 潮流 API 的动态过程仿真计算

2.1 PSS/E 潮流计算接口层设计

本文采用 C++ 和 Fortran 混合编程技术, 对所需的 PSS/E 潮流计算接口进行二次开发和封装, 提供统一的 C++ 接口层供应用程序调用。

依据仿真系统对 PSS/E 潮流计算的接口需求, 将接口层分为三个大类, 如图 1 所示。

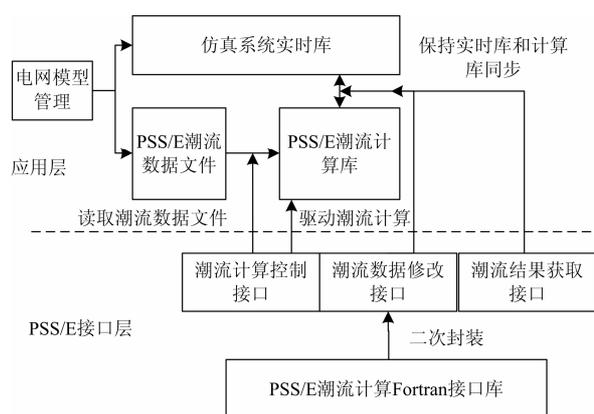


图 1 PSS/E 潮流计算接口层示意图

Fig. 1 Interface layer of PSS/E power flow calculation

1) 潮流计算控制类, 包括 PSS/E 潮流数据文件的读取、断面的保存、PSS/E 潮流计算流程的控制等。

2) 设备潮流数据修改类, 实现对 PSS/E 计算库中设备潮流数据和状态的修改。同时修改仿真实时数据库中的设备状态和潮流数据, 以保持仿真实时数据库和 PSS/E 计算数据库中的电网方式一致性。

3) 设备潮流结果获取类。包括获取 PSS/E 所有节点的电压结果、所有支路的潮流结果等。同时, 根据仿真实时数据库和 PSS/E 设备模型的映射关系, 将获取的结果快速写入仿真实时数据库中。

接口层主要的接口函数如表 1 所示。

表 1 接口层主要接口函数

Table 1 Main interface function of interface layer

接口类型	接口函数	功能说明
	PSSEINIT	对 PSS/E 进行初始化
	READAPI	读取潮流数据文件
潮流计算控制类	SAVENW	保存案例文件
	FNSLAPI	使用牛顿-拉夫逊法计算潮流
	NSOLAPI	使用 PQ 解耦法计算潮流
设备潮流数据修改类	BRANCH_API_2	修改支路状态 (主要指开关刀闸状态)
	LOAD_API_4	修改负荷有功无功
	MACHINE_CHNG_2	修改发电机有功无功
设备潮流结果获取类	BRNFLO	获取支路潮流结果 (含两卷变)
	BUSDAT	获取节点潮流结果
	MACDAT	获取发电机潮流结果
	LODDT2	获取负荷潮流结果

2.2 基于接口层的 PSS/E 潮流计算全过程控制

在已经使用模型管理生成了仿真实时数据库和 PSS/E 潮流数据文件的情况下, 应用层可以使用接口层对 PSS/E 潮流计算流程进行控制。应用程序使用接口层进行一次完整的潮流计算流程如下:

1) 调用 PSSINIT 接口进行 PSS/E 的初始化。

2) 调用 READAPI 接口从指定的潮流数据文件中读取电网数据, 写入 PSS/E 计算库中。

3) 如需要对设备状态进行修改, 则调用对应的数据修改类接口进行操作, 该接口将同时修改仿真实时库和 PSS/E 计算库中的设备状态。

4) 调用 FNSLAPI 进行潮流计算。

5) 调用对应的设备潮流结果获取类接口, 从 PSS/E 中读取计算结果, 并写入仿真实时库中。

2.3 基于接口层的用户自定义模型与 PSS/E 潮流计算交互

上节基于应用程序对 PSS/E 潮流计算接口层调用实现了单次潮流计算, 通过对流程的控制, 可以方便地对潮流计算的周期进行控制, 扩展为电网中长期过程的仿真。但单纯的潮流计算并没有计及电网的动态过程, 无法真实反应电网发生扰动后的系统频率变化和发电机调速器的响应。

通过对发电机调速器的自定义建模和仿真, 并通过接口层与 PSS/E 潮流计算进行结果的交互, 建立反映电网动态过程的仿真系统。本文的自定义建模参考 PSASP 的调速器模型^[15], 传递函数框图如图 2 所示, 参数采用汽轮机参数, 并近似采用全网统一的频率进行计算。

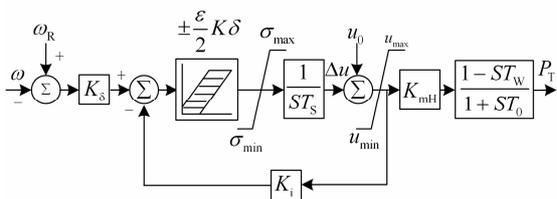


图 2 调速器传递函数框图

Fig. 2 Transfer function schematic of governor

PSS/E 潮流与调速器自定义模型的交互计算流程如下:

1) 调用 FNSLAPI 进行潮流计算, 并使用潮流结果获取接口获取数据, 包括发电机有功出力、负荷有功和支路有功, 存放在仿真系统实时库中。

2) 根据潮流结果计算系统总出力 P_G 、总负荷 P_L 和网损 P_{loss} , 进而得到系统的加速功率 $P_{acc} = P_G - P_L - P_{loss}$ 。

$$3) \text{ 求解微分方程 } \sum T_j \cdot \frac{d\Delta\omega}{dt} = P_{acc} - D\Delta\omega,$$

得到系统的频率偏差 $\Delta\omega$ 。其中, $\sum T_j$ 为发电机惯性时间常数总和; D 为系统阻尼系数。

4) 以 $\Delta\omega$ 作为输入量, 采用改进欧拉进行求解, 根据传递函数框图, 逐步求解输出量, 最后计算出每台发电机的机械功率 $P_{Ti} (i = 1, 2, \dots, m)$ 。

5) 对每台发电机依次调用 MACHINE_CHNG_2 接口修正 PSS/E 计算库的有功值为 P_{Ti} , 并同步更新仿真系统实时库的有功值。

6) 转入步骤 1), 开始下一轮仿真计算。

与 PSS/E 提供的 UPI 功能相比, 利用 API 接口来实现与用户自定义模型的交互具有更高的灵活性和可控性, 可以在程序运行的任意时刻调用 API 接口与用户自定义模型进行交互, 且交互规模不受限制。

2.4 不平衡功率动态预分配

系统发生扰动时, 发电机的机械功率和电磁功率的平衡关系被打破。而传统动态潮流计算时, 直接将发电机的机械功率参与潮流计算, 系统不平衡功率则堆积到平衡机上, 容易造成潮流分布不合理的情况。本文提出不平衡功率动态预分配技术, 将仿真实时数据库中发电机的功率进行扩展, 调速器的仿真计算仍采用机械功率进行计算, 而在潮流计算前将系统的不平衡功率根据调速器特性预分配到发电机上, 得到发电机的电磁功率, 以分配后的电磁功率进行潮流计算, 降低系统扰动过程中支路潮流的波动, 得到更为准确的潮流计算结果。不平衡功率动态预分配的步骤如下:

1) 按上节 1)~4) 步进行计算, 得到计及调速器响应后的发电机机械功率 P_{Ti} , 取电磁功率 $P_{Ei}^{(0)} = P_{Ti}$ 。

2) 使用电磁功率 $P_{Ei}^{(0)}$ 计算系统总出力 $P_G^{(0)}$, 系统负荷和网损则近似取上一次计算结果, 得到系统新的不平衡功率 $P_{acc}^{(0)}$, 动态预分配就是对这些不平衡功率进行预分配。

3) 计算每台发电机的分配因子, 分配因子的选取方式按照机组的频率响应调节能力 K_G 来进行设定。第 i 台发电机的分配因子为

$$\lambda_i = K_{Gi} / \sum_{j=1}^m K_{Gj}$$

则第 i 台发电机分配的电磁功率为

$$\Delta P_{Ei} = \lambda_i \cdot P_{acc}^{(0)}$$

同时应满足约束

$$P_i \leq P_{Ti} + \Delta P_{Ei} \leq \bar{P}_i$$

其中, P_i 和 \bar{P}_i 分别对应了第 i 台发电机的出力下限值和上限值。

从而得到第 i 台的机械功率

$$P_{Ei}^{(1)} = P_{Ei}^{(0)} + \Delta P_{Ei}$$

4) 如果还有剩余的平衡功率, 则转入步骤 2) 进行下一轮迭代, 直到系统不平衡功率小于设定的门限值。

5) 调用 MACHINE_CHNG_2 接口将经过预分配后的电磁功率 $P_{Ei}^{(n)}$ 写入 PSS/E 计算库, 得到功率平衡的全网系统注入, 并进行潮流计算。

3 动态过程仿真系统设计与实现

除了电网模型管理和仿真计算, 仿真系统还包括人机交互界面、数据交互接口模块, 系统总体结构图如图 3 所示。

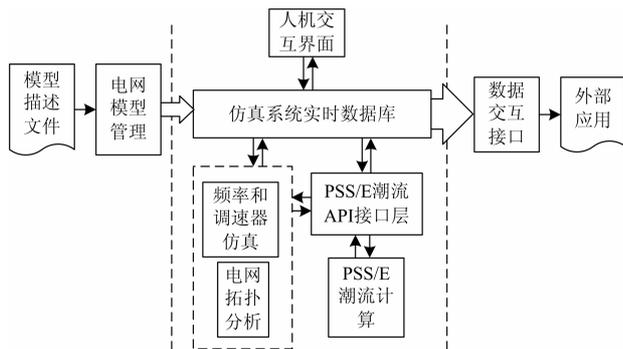


图 3 仿真系统总体结构图

Fig. 3 Structure diagram of simulation system

人机交互界面主要提供数据展示, 设备交互操作等功能; 数据交互接口负责将电网仿真数据发送给外部应用程序, 并接收处理外部应用程序下发的遥控、遥调等操作指令。仿真系统的总体流程如图 4 所示。

为满足实时监控类应用软件对遥测数据的采样需求, 仿真系统潮流计算周期取为 1 s, 频率计算和调速器仿真计算步长取为 0.2 s, 即 5 个频率计算周期后进行一次潮流计算, 这样一方面能够更加精确地反应频率的扰动过程, 另一方面也能加速发电机和负荷对不平衡功率的吸收, 促使系统更快地到达新的平衡点。

4 算例分析

4.1 IEEE9 节点算例

首先使用小节点算例进行仿真计算, 以便能够

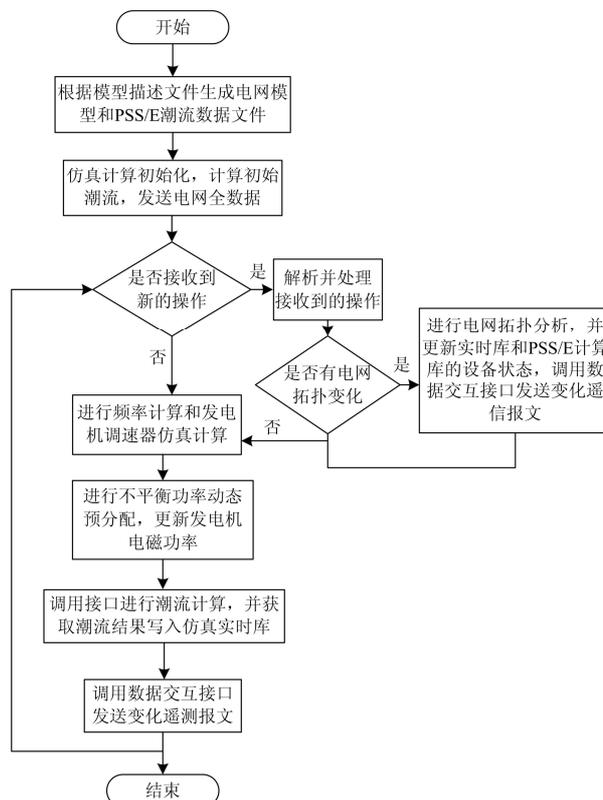


图 4 仿真计算流程图

Fig. 4 Flow chart of simulate calculation

更好地对计算结果进行分析说明。9 节点系统模型和参数由 BPA 格式文件导入。取节点 2 为平衡节点, 设发电机的调差系数 σ 均为 6%, 不考虑出力调节的限值。设置系统扰动为仿真系统启动后 2 s 时节点 3 所连发电机有功出力减少 60 MW。扰动后的系统频率曲线如图 5 所示。

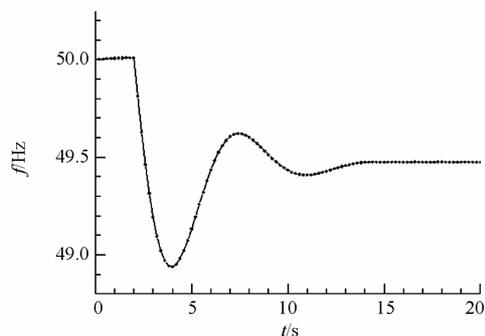


图 5 系统频率曲线

Fig. 5 System frequency curve

表 2 所示为未进行不平衡功率动态预分配, 系统发生扰动后平衡机功率和支路潮流的变化情况。

由表 2 可见, 第 2 s 发生扰动后, 经过五个步长的频率计算, 部分不平衡功率被发电机和负荷共

同分担, 到第 3 s 时, 仍有约 37.5 MW 的不平衡功率被平衡机吸收, 造成平衡机附近支路潮流增大。系统稳定后, 不平衡功率由系统共同承担, 平衡机功率和支路潮流趋于平稳。由表中数据可见, 进入稳态后平衡机附近的支路潮流分布与扰动过程中还是有比较大的差距。

表 2 未进行动态预分配的计算结果

Table 2 Calculation results whithout dynamic predistribution

仿真 时间/s	平衡机功 率/MW		支路功率/MW				
	2	7-8	9-8	7-5	9-6	4-5	4-6
	2	163.3	75.87	24.23	87.13	60.56	38.03
3	200.8	108.7	-11.2	91.61	43.25	30.29	44.47
4	177.1	95.36	1.35	81.4	41.22	39.46	45.77
5	167.8	89.94	7.37	77.48	40.84	44.16	46.71
6	171.5	91.96	6.33	79.22	41.53	43.62	46.89
7	179.7	96.53	2.31	82.78	42.34	40.74	46.56
8	185.1	99.58	-0.73	85.07	42.71	38.45	46.18
9	185.6	99.95	-1.39	85.28	42.63	37.88	46.01
10	183.4	98.71	-0.41	84.29	42.36	38.55	46.05
11	181.1	97.42	0.79	83.31	42.16	39.44	46.17
12	180.2	96.91	1.37	82.93	42.13	39.89	46.26

表 3 所示为进行不平衡功率动态预分配, 系统发生扰动后平衡机功率和支路潮流的变化情况。

表 3 进行动态预分配的计算结果

Table 3 Calculation results whith dynamic predistribution

仿真 时间/s	平衡机功 率/MW		支路功率/MW				
	2	7-8	9-8	7-5	9-6	4-5	4-6
	2	163.3	75.87	24.23	87.13	60.56	38.03
3	180.7	97.26	0.25	83.02	41.83	38.85	45.89
4	179.8	96.88	-0.16	82.54	41.41	38.32	45.57
5	180.5	97.17	0.16	82.90	41.73	38.73	45.81
6	181.5	97.62	0.67	83.47	42.22	39.37	46.18
7	182.1	97.87	0.97	83.79	42.50	39.73	46.40
8	182.0	97.87	0.96	83.79	42.50	39.73	46.39
9	181.7	97.73	0.81	83.62	42.35	39.54	46.28
10	181.5	97.62	0.67	83.47	42.22	39.37	46.18
11	181.1	97.43	0.78	83.31	42.16	39.43	46.17
12	181.5	97.61	0.66	83.46	42.21	39.36	46.18

由表 3 可见, 在扰动过程中, 平衡机功率和支路功率都比较平稳, 且结果与表中进入稳态后的值基本一致, 有效避免了扰动过程中平衡机功率和支路功率的波动。

4.2 华北电网算例

为了验证仿真系统的计算性能, 采用华北电网某时刻的实际电网模型进行仿真计算。电网模型和运行方式由实际调度系统生成的标准 CIM/E 格式文件导入, 包含了实际系统所有开关刀闸设备。系统规模如表 4 所示。

表 4 算例规模

Table 4 Scale of example

物理节点数	计算节点数	发电机数	负荷数	支路数
51 735	2 728	782	4 682	5 085

在仿真过程中通过 API 接口设置开关变位和出力负荷调整等系统扰动, 在系统连续运行的情况下进行采样, 观察系统的计算性能, 各主要计算模块平均花费时间如表 5 所示。

表 5 各模块计算时间

Table 5 Modules computing time

计算内容	计算时间/s
网络拓扑分析 (有开关变位时才启动计算)	0.11
频率计算 (以 0.2 s 为步长连续计算 5 次)	0.015
修改 PSS/E 发电机值和负荷值	0.28
潮流计算 (采用平启动模式, 并含获取 PSS/E 潮流计算结果所花费时间)	0.224
全遥测数据报文发送	0.038

在极端情况下: ①每个周期都出现遥信变位, 需要进行拓扑分析; ②每次都发送全遥测报文; ③潮流采用平启动模式, 一个仿真周期总耗时为 0.667 s, 而正常计算周期应该小于该值, 因此, 仿真系统完全能够满足应用程序对秒级数据采样的要求。

5 结语

本文基于 PSS/E 的潮流 API 接口进行二次开发, 设计并实现了以 PSS/E 潮流计算为核心的, 反映电网中长期动态过程的仿真系统。通过对 PSS/E 接口的封装、调用, 以及与用户自定义模型之间的交互, 阐述了使用 PSS/E 的 API 接口进行二次开发的方法。通过算例对开发的仿真系统进行仿真验证, 仿真结果表明, 基于 API 接口二次开发的应用程序, 能够满足准确性和实时性的要求, 非常适用于大型应用程序的开发以及与现有用户应用程序的快速集成。

参考文献

[1] 高宗和, 陈刚, 杨军峰, 等. 特高压互联电网联络线功率控制 (一)AGC 控制策略[J]. 电力系统自动化, 2009,

- 33(15): 51-55.
GAO Zong-he, CHEN Gang, YANG Jun-feng, et al. Active power control for tie-lines in uhv interconnected power grid part one agc control strategies[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(15): 51-55.
- [2] 温步瀛. 计及调速器死区影响的两区域互联电力系统 AGC 研究[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 176-182.
WEN Bu-ying. Research on AGC of two-area interconnected power system considering the effect of the governor dead band[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 176-182.
- [3] 倪琳娜, 罗吉, 王少荣. 含风电电力系统的频率控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(增刊 1): 235-241.
NI Lin-na, LUO Ji, WANG Shao-rong. Frequency control of power system with wind power integration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(S1): 235-241.
- [4] 魏文辉, 石俊杰, 高平, 等. 国家电力调度通信中心调度员培训模拟系统[J]. 电网技术, 2008, 32(6): 19-26.
WEI Wen-hui, SHI Jun-jie, GAO Ping, et al. Dispatcher training simulator of China National Power Dispatching & Communication Center[J]. Power System Technology, 2008, 32(6): 19-26.
- [5] 胡晓侠, 胡炎. 基于 DTS 的集控站仿真培训系统实现方法[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 86-90.
HU Xiao-xia, HU Yan. An implementation method for central supervision station training system based on DTS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 86-90.
- [6] 张扬, 陆承宇, 杜振东. 电力系统仿真软件 PSS/E 简介[J]. 华东电力, 1997, 25(1): 6-9.
ZHANG Yang, LU Cheng-yu, DU Zhen-dong. Introduction of PSS/E[J]. East China Electric Power, 1997, 25(1): 6-9.
- [7] 祝瑞金, 傅业盛. 电力系统高级仿真软件 PSS/E 的消化与应用[J]. 华东电力, 2001, 29(2): 8-11, 62.
ZU Rui-jin, FU Ye-sheng. Digestion and application of advanced simulating software PSS/E for power system[J]. East China Electric Power, 2001, 29(2): 8-11, 62.
- [8] 黄学良, 刘志仁, 祝瑞金, 等. 大容量变速恒频风电机组接入对电网运行的影响分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(4): 142-149.
HUANG Xue-liang, LIU Zhi-ren, ZHU Rui-jin, et al. Impact of power system integrated with large capacity of variable speed constant frequency wind turbines[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(4): 142-149.
- [9] 屈刚, 程浩忠, 马则良, 等. 应用电力仿真软件 PSS/E 计算网络可用传输能力[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2264-2269.
QU Gang, CHENG Hao-zhong, MA Ze-liang, et al. Network available transfer capability calculation by PSS/E software[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2264-2269.
- [10] 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, 82.
XIE Da-peng, WANG Xiao-ru, 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, 82.
- [11] 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 Yi-xuan, WANG Xiao-ru, LIAO Guo-dong, et al. User defined excitation system models in PSS/E[J]. Power System Technology, 2009, 33(18): 78-83.
- [12] 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.
- [13] 廖晓晖, 张沛超. 基于 Python 开发 PSS/E 高级应用程序[J]. 继电器, 2008, 36(11): 9-12.
LIAO Xiao-hui, ZHANG Pei-chao. Developing advanced PSS/E applications based on Python[J]. Relay, 2008, 36(11): 9-12.
- [14] Siemens. PSS®E 33.3 application program interface (API)[R].
- [15] 中国电力科学研究院. 电力系统分析综合程序 7.0 版基础数据库用户手册[R].
-
- 收稿日期: 2013-10-09; 修回日期: 2014-01-06
作者简介:
王勇(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统分析与仿真方面的研究; E-mail: wangyongepri@gmail.com
李峰(1976-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统分析与仿真方面的研究;
潘玲玲(1985-), 女, 硕士, 工程师, 主要从事电力系统分析与仿真方面的研究。