

DOI: 10.7667/PSPC150955

基于 CIM/E 全模型的扩展 PSS/E 潮流计算

王 勇, 於益军, 李 峰, 潘玲玲

(中国电力科学研究院, 江苏 南京 210003)

摘要: 基于人机界面的 PSS/E 单步潮流计算存在模型维护工作量大和扩展性较差的问题。提出了一种基于 CIM/E 全模型的扩展 PSS/E 潮流计算方法。以网络层次模型库为中间层, 将 CIM/E 模型解析到中间层数据库并生成实时同步的 PSS/E 计算库, 实现电网全物理模型的自动建模。基于 API 接口二次开发和封装, 建立接口层, 通过外部程序对 PSS/E 进行流程控制, 实现潮流计算的自动周期运行。以层次库为输入输出接口, 接收处理外部应用的设备操作指令, 实现设备操作的自动交互。基于层次库实时拓扑分析, 对 PSS/E 全模型仿真中的拓扑问题进行修正, 保证了拓扑分析的正确性。使用华东电网实际电网模型进行实际应用, 仿真结果证明了该方法的正确性和实用性。
关键词: CIM/E; PSS/E; 全模型; 接口二次开发; 实时拓扑分析; 潮流计算

An extended PSS/E power flow calculation based on CIM/E full model

WANG Yong, YU Yijun, LI Feng, PAN Lingling

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

Abstract: The single step power flow calculation of PSS/E based on man-machine interface have problems such as heavy workload in model maintenance and poor scalability. An extensible PSS/E power flow calculation method based on CIM/E full model is proposed. By using hierarchical network model database as interlayer, CIM/E model is parsed into the interlayer database and the synchronized PSS/E calculation database is generated simultaneously, and full physical model of power grid is built automatically. Interface layer is built based on API secondary development and packaging, and power flow calculation is run automatically and periodically by flow control of PSS/E through external application. By using hierarchical network model database as input and output interface to receive and process device operational order from external application, interaction of device operation is realized automatically. Based on real-time topological analysis of hierarchical database, the topological problems of PSS/E simulation with full model are fixed, which ensures the validity of topological analysis. East China Power Grid model is used for practical application, and the simulation results verify the validity and practicality of this method.

Key words: CIM/E; PSS/E; full model; interface secondary development; real-time topological analysis; power flow calculation

0 引言

PSS/E 是调度运行部门常用的电力系统仿真分析软件^[1-3]。利用 PSS/E 进行潮流分析的典型模式是基于软件提供的人机界面进行交互操作, 首先使用软件提供的元件库手动建立电网设备模型, 然后基于元件库列表进行设备操作, 执行单步潮流计算。

这种应用模式存在着模型维护工作量大和扩展性不足等方面的问题, 主要表现在: ①手动建模工作量大, 维护成本高。为了减少建模工作量, 通常建立的是不包含开关刀闸的拓扑模型, 无法对双母分裂运行、线路单端充电等运行方式进行精细化仿真。②基于人机交互界面的手动单步执行模式无法实现对电网自动的连续仿真分析。当需要对电网进行方式调整、设备 $N-1$ 开断分析等重复操作时, 执行效率低下。

为降低建模工作量, 在仿真分析软件私有格式

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”

的相互转换方面已经开展了相关工作^[4-5],但本质上仍无法避免数据源头的建模工作。实际上,电网调控系统中包含了电网分析所需的所有模型和拓扑信息,可以作为各类分析软件的模型源端。从调控系统导出标准 CIM/E 模型文件来进行仿真分析软件的自动建模,实现不同系统间的源端维护、模型共享^[6]是非常必要且有效的。

为提升扩展性,仿真分析软件提供了用户程序接口(UPI)功能来与用户自定义程序进行交互^[7-9],但UPI方式存在明显的局限性,主要表现在:①对接口的节点规模有限制,通常只允许系统中少量的节点与用户自定义程序进行接口交互;②UPI嵌入到分析软件的计算流程的某一固定环节中,无法实现外部程序对计算流程的驱动和控制。

相比于UPI,PSS/E提供了更为灵活的API接口功能,用户自定义程序通过API接口可以实现对PSS/E计算流程和周期的完全控制,更适用于进行大型应用程序的开发^[10-11]。文献[10]提出了基于API接口二次开发和封装建立潮流计算接口层的总体设计方案,但未给出具体的应用。文献[11]基于二次开发和封装建立接口层,实现对PSS/E潮流计算的驱动,并结合调速器模型建立中长期动态过程仿真系统。但文献未涉及基于全模型的PSS/E自动建模方法以及PSS/E全模型潮流计算的具体实现。

本文在上述研究的基础上,提出了以网络层模型库为中间层的CIM/E全模型自动建模技术,以及基于接口二次开发进行全模型潮流计算的扩展PSS/E连续潮流计算方法。首先对CIM/E全模型进行解析,建立双向同步的网络层次库模型和PSS/E计算库模型。接着基于接口二次开发建立仿真接口层,实现仿真进程对PSS/E的设备操作和潮流计算驱动,并对PSS/E全模型潮流计算应用过程中的设备同步操作、实时拓扑分析进行了阐述。最后采用华东电网实际模型对该方法进行仿真验证。

1 网络层次模型库

网络层次模型库(以下简称层次库)是EMS高级应用软件中的一种实时数据库结构^[12]。其特点是建立了电力系统模型的层次和隶属关系,对设备进行分级存储,同时建立了层级记录之间的对应关系,方便地进行查询和定位。层次库中的设备以节点(NODE)为索引进行存储。设备之间的连接关系通过节点来确定。

网络拓扑分析、分析结果图形展示等传统EMS高级应用软件模块都基于层次库进行设计开发。同时,层次库是一个开放的数据库,用户自定义程序

遵循接口访问规则即可实现对层次库的访问,进行功能开发。

本文以层次库作为中间层数据库,建立仿真控制程序与PSS/E潮流计算的数据闭环传输通道。一方面可直接复用传统EMS高级应用模块功能,实现电网实时拓扑分析和图形展示等功能;另一方面,以层次库作为外部程序与仿真内部系统的交互接口,通过操作层次库来实现设备操作、潮流结果获取等功能。以层次库为中间层的系统总体结构如图1所示。

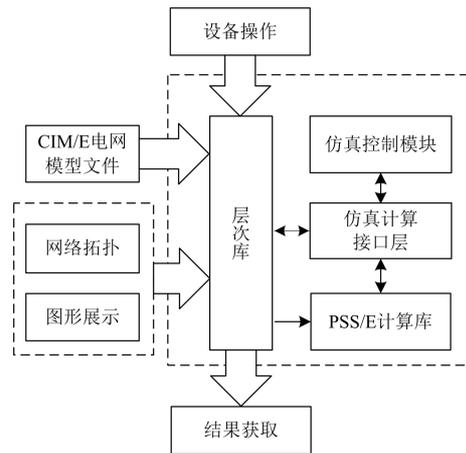


图1 系统总体结构图

Fig. 1 Structure diagram of system

以层次库作为数据的输入输出接口,使得PSS/E全模型潮流计算系统更具扩展性。可直接将PSS/E作为独立潮流计算模块嵌入EMS系统中,并通过层次库实现与传统EMS其他高级应用模块的对接。

2 模型建立

以层次库为中间层进行PSS/E计算库建模,提高PSS/E潮流计算的扩展性和灵活性。以节点编号为特征值建立并维护层次库与PSS/E计算库的关联关系,保持数据的实时同步,使层次库形成PSS/E计算库的完整镜像。外部应用程序无需直接访问PSS/E内部计算库,所有设备操作以及计算结果展示都可以通过访问层次库来开展。基于CIM/E的全模型建模按以下步骤进行:

1) 调用文件解析器对CIM/E文件进行解析,生成符合层次库特征的电网层次结构。将解析好的结构整体写入层次库中,形成完整的电网模型。导入后的层次库包含了设备的模型属性以及运行状态。

2) PSS/E计算库的设备以所属节点号和设备ID作为关键属性,应首先建立PSS/E的节点信息。将

层次库中 NODE(节点)记录导出并写入 PSS/E 数据文件的 BUS 字段中,层次库与 PSS/E 计算库的节点编号严格一一对应。

3) 按照 PSS/E 数据文件字段顺序从层次库中取出对应设备记录,生成 PSS/E 所需的设备结构,包括所连接节点编号、设备 ID 以及设备状态信息等,写入数据文件的对应字段中。

4) 导出设备时,在层次库对应设备记录下,保留设备对应的 PSS/E 关键属性,包括所连节点编号和设备 ID,仿真计算接口通过层次库快速定位设备在 PSS/E 计算库中的位置。

具体应用过程中,需注意以下几点:

1) PSS/E 将开关/刀闸模型当作零阻抗支路处理^[13],写入数据文件时应与支路放在同一个字段中,并在 ID 中添加前缀来与支路进行区分。其支路电抗取值缺省值 0.000 1(标么值)。

2) PSS/E 提供了三绕组变压器模型^[13],但其中性点没有电压和相角结果,无法计算绕组的潮流结果。建议三绕组变压器建模时仍将其等值为三个两绕组变压器来处理:将三绕组变压器的中性点侧作为标准侧,高、中、低侧分别作为非标准侧进行非标准变比的折算。

3) 发电机缺省当作 PV 节点进行处理,需正确维护发电机的机端电压标么值。如需指定为 PQ 节点,可在数据文件中将其无功上下限置成与无功值相等。

3 接口层设计

PSS/E 潮流计算包括装载潮流数据文件、启动潮流计算、输出计算结果几个步骤,常规操作是基于界面单步执行。利用 PSS/E 提供的 API 接口^[14],由外部应用程序驱动 PSS/E 进行计算,实现对 PSS/E 计算流程的完全控制,同时将单步计算扩展到周期计算,实现潮流的动态计算过程。

基于 Fortran API 接口,采用 C++和 Fortran 混合编程技术,对所需的接口进行二次开发和封装,建立 C++函数接口层。仿真控制进程通过接口层实现两方面的功能:①调用 API 接口驱动计算或修改 PSS/E 计算库中的设备数据。②同时更新层次库中对应的设备状态或者计算结果,确保层次库与 PSS/E 计算库保持同步。

Fortran 接口的二次开发流程包括以下几个步骤:

1) 基于 C++和 Fortran 混合编程规范^[15],在 C++程序中对所需的 Fortran 接口函数进行声明。

2) 定义 C++接口函数,在函数中对所声明的

Fortran 接口函数进行调用,并对层次库进行同步操作。

3) 采用默认的编译选项对程序进行编译,编译时需链接接口函数 psseng.lib。

4) 程序执行需要调用接口函数 psseng.dll 动态库。

将 API 接口封装成接口层后,仿真控制进程可直接调用接口层函数对 PSS/E 潮流计算流程进行控制。一个完整的 PSS/E 潮流计算周期流程如图 2 所示。为叙述方便,封装后的接口函数仍直接使用 FORTRAN 原接口函数名称。

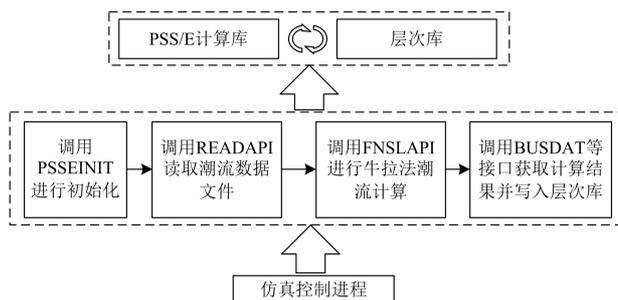


图 2 潮流计算流程

Fig. 2 Flow chart of power flow calculation

接口层提供的接口函数主要分为以下几类:①潮流进程控制类。包括 PSS/E 潮流初始化、驱动 PSS/E 潮流计算、数据文件的装载等。②设备状态修改类。包括开关刀闸状态的调整、发电机和负荷的有功无功调整、变压器档位调节等操作。这类操作接口同时修改层次库和 PSS/E 计算库中的设备状态。③潮流结果获取类。包括从 PSS/E 计算库中获取各类设备潮流计算结果并写入层次库中。

外部应用程序通过层次库与仿真系统进行交互,实现设备操作、计算结果获取等功能。以拉开开关操作为例,处理流程如下:

1) 外部应用程序传入操作类型、设备在层次库的下标以及设备的最终状态。

2) 仿真控制进程接收到操作指令后,调用接口函数进行操作。首先定位到层次库开关记录,将该记录中的状态域置为分。

3) 从层次库中提取该设备的 PSS/E 属性(所连节点编号、设备 ID),调用 BRANCH_API_2 接口修改 PSS/E 计算库中的开关状态。

4 实时拓扑分析

4.1 拓扑变化分析

开关刀闸在 PSS/E 中作为零阻抗支路参与计算,使模型中包含了非母线节点。当调用接口函数

操作开关刀闸时, PSS/E 不会对状态变化后的设备和非母线节点重新拓扑, 形成拓扑死岛, 造成潮流计算异常。以图 3 所示的线路为例, 节点 1、8 为母线节点, 其余均为非母线节点。

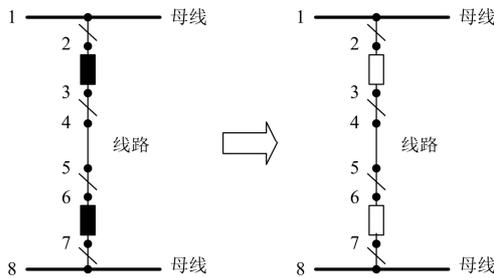


图 3 线路接线图

Fig. 3 Wiring diagram of line

当调用设备操作接口拉开线路两端开关时, 节点 3~6 形成一个没有平衡节点的孤岛, 导致 PSS/E 潮流计算错误。

借助 EMS 高级应用中的拓扑分析模块, 对层次库设备连接关系进行实时拓扑分析, 结合设备操作接口, 对 PSS/E 设备状态变化后的拓扑问题进行修正, 确保 PSS/E 全模型潮流计算的可靠性。当发生拓扑变化时, 按以下流程进行实时拓扑分析:

1) 保存当前层次库所有设备的拓扑状态到临时数组中。重置层次所有设备拓扑状态为 0。

2) 以一台带电发电机节点为起始点, 采用广度优先或者深度优先等搜索方法, 通过设备的节点连接关系进行拓扑路径搜索, 对搜索过的设备进行拓扑着色。

3) 拓扑搜索结束后, 层次库中的所有设备状态和电气岛信息都将被更新。将层次库的设备状态与临时数组保存的初始状态进行比较, 找出变化设备。

4) 根据设备类型调用相应的设备状态修改接口对 PSS/E 中的设备进行修改。

按上述步骤执行拓扑分析后, PSS/E 中节点 3~6、刀闸 3-4、刀闸 5-6、线路 4-5 的状态置为退出, PSS/E 潮流计算正常。

4.2 系统并列/解列分析

PSS/E 需手动指定每个电气岛的平衡节点, 无法跟踪电气岛的变化。拓扑变化造成系统电气岛发生变化时, 需借助层次库实时拓扑分析对 PSS/E 平衡节点进行修正。平衡节点的修正按以下步骤进行:

1) 进行 4.1 节实时拓扑分析之前, 记录当前的电气岛数量以及电气岛对应的平衡节点。

2) 在实时拓扑分析结束后, 层次库形成了新的电气岛信息, 据此判断电气岛数量是否发生变化。

3) 如果电气岛发生变化, 先重置当前所有平衡节点。调用 GET_BUS_INTEGER 接口获取当前所有发电机节点类型, 对于平衡节点, 使用 BUS_API_2 接口将节点类型置为普通发电机节点。

4) 对电气岛进行遍历, 每个电气岛以岛内出力最大发电机为该岛平衡机。调用 BUS_API_2 接口将 PSS/E 中平衡机所连的节点类型置为平衡节点。

5 仿真计算流程

基于封装的仿真计算接口层, 进行仿真流程控制, 驱动 PSS/E 进行完整的潮流计算, 将单步潮流计算扩展为自动周期计算。每个潮流计算周期中接收并处理设备操作指令, 进行实时拓扑分析, 形成完整的潮流计算流程。总体结构如图 4 所示。

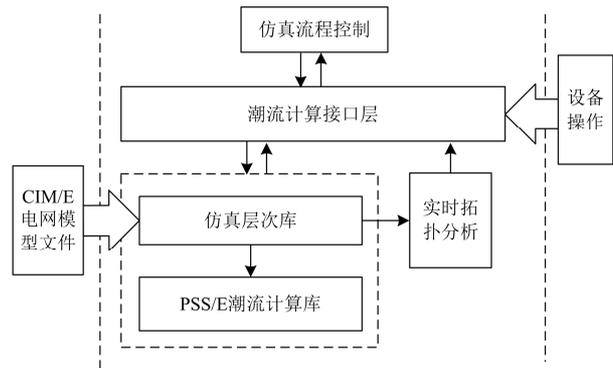


图 4 仿真计算总体结构图

Fig. 4 Structure diagram of simulation calculation

设备操作通过外部应用程序调用接口层的设备状态修改类接口对指定设备进行操作, 主要包括开关/刀闸操作、发电机负荷的有功无功置数操作、变压器档位调节操作等。

潮流控制进程的主要功能: ①潮流计算控制。包括 PSS/E 数据文件的读取、PSS/E 潮流计算的初始化以及 PSS/E 潮流计算的驱动。②接收并处理设备操作指令。潮流计算前接收外部应用程序发送的操作指令, 修改层次库和 PSS/E 计算库中的设备状态。③实时拓扑分析控制。发生拓扑变化时, 调用实时拓扑分析对层次库和 PSS/E 计算库中的设备拓扑状态。④获取 PSS/E 计算结果。调用接口层潮流结果获取类接口, 将 PSS/E 潮流计算结果写入层次库中。完整的仿真控制流程如图 5 所示。

6 应用实例

从华东实际调控系统中导出 CIM/E 模型, 建立层次库和 PSS/E 计算库, 模型中包含了全部的开关刀闸设备, 物理节点数为 49 908, 计算节点数为 2 890, 开关刀闸数量为 59 960。仿真周期设置为 1 s。

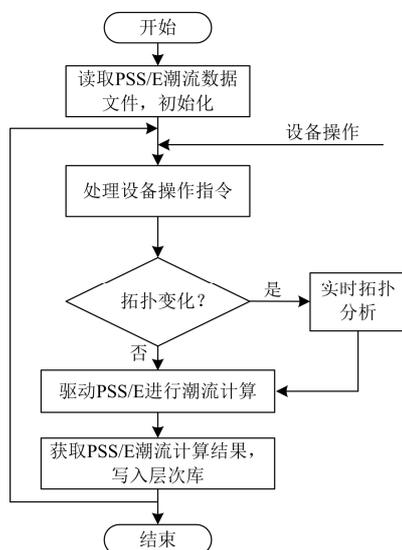


图 5 仿真控制流程图

Fig. 5 Flow chart of simulation control

6.1 性能与稳定性测试

为验证仿真计算的性能与稳定性, 使用外部测试程序对电网进行随机扰动, 扰动内容包括发电机有功无功变化、负荷有功无功变化、开关状态变化。对仿真程序进行 12 h 连续运行测试, 测试结果表明, PSS/E 潮流收敛率达到 100%。从潮流计算开始到计算结果写入层次库, 一个潮流计算周期平均时间为 0.72 s, 满足实时性要求。

6.2 特殊接线方式测试

电网模型中包含了开关刀闸模型, 可以对方式模型无法模拟的运行方式进行正确判别与仿真, 如线路单端充电和双母分裂运行。

选取一条处于正常运行状态的 220 kV 线路, 使用外部测试程序拉开线路首端的开关, 进行单端充电仿真测试, 仿真结果如表 1 所示。测试结果表明, PSS/E 潮流计算能够对接线方式进行正确判别, 计算结果正确。

表 1 单端充电仿真结果

Table 1 Result of single terminal charging

遥测		操作前值/MW	操作后值/MW
线路首端	有功	128.9	0
	无功	31.6	0
线路末端	有功	-128.7	0
	无功	-33.0	-4.8

对该线路末端厂站的双母分裂运行方式进行仿真测试, 使用外部测试程序拉开母联开关, 仿真结果如表 2 所示。测试结果表明, PSS/E 能够正确判别出双母分裂运行状态仿真, 仿真结果正确。

表 2 双母分裂运行仿真结果

Table 2 Result of double busbar subsection

	遥测	操作前值	操作后值
I 段母线	电压/kV	224.9	225.2
	相角/(°)	-15.4	-15.4
II 段母线	电压/kV	224.9	224.2
	相角/(°)	-15.4	-15.4

6.3 系统解列测试

为了验证拓扑分析的正确性, 对系统进行解列操作。通过调整运行方式, 使得福建电网仅通过一条联络线与华东主网相连, 联络线潮流为 343 MW, 潮流方向由待解列的福建电流向主网。断开联络线两端开关, 使福建电网从主网解列, 操作前后系统的主要运行工况如表 3 所示。

表 3 系统解列仿真

Table 3 Result of system splitting

	解列前	解列后
总有功出力	94 384 MW	主岛: 82 381 MW 小岛: 11 935 MW
		主岛: 81 768 MW 小岛: 11 799 MW
总有功负荷	93 598 MW	主岛: 铜陵厂 5 号机 小岛: 晴川核电站 2 号机
平衡机	晴川核电站 2 号机	小岛: 晴川核电站 2 号机

解列前系统平衡机处于待解列的福建电网上, 系统解列后, 电网拓扑分析自动对电网的拓扑变化情况进行判断, 识别出电气岛数变化, 自动重新搜索并重置 PSS/E 中所有电气岛的平衡机, 解列前的平衡机位于小岛上, 因此小岛的平衡机未发生变化, 主岛自动指定了一个新的平衡机。通过上述处理后, PSS/E 多岛计算正常, 潮流结果合理。

7 结语

提出了一种基于 CIM/E 电网模型文件的 PSS/E 仿真方法。以层次库为中间层, 通过解析 CIM/E 文件建立包含开关刀闸的 PSS/E 全物理模型计算库, 实现模型免维护, 以及电网特殊接线方式的精细化仿真。基于 PSS/E 的 FORTRAN API 接口设计接口层, 驱动 PSS/E 进行周期潮流计算。基于层次库的网络拓扑对 PSS/E 潮流计算中的拓扑判别问题进行修正, 保证 PSS/E 潮流计算的可靠性。本文提出的仿真方法为 PSS/E 的扩展应用提供了一种新的思路, 并对应用中存在的问题进行了阐述, 对 PSS/E 的二次开发具有一定的参考价值。以层次库作为中间层的设计使得系统更具扩展性, 实现与传统 EMS 高级应用模块的对接, 可将 PSS/E 作为独立潮流计

算模块嵌入 EMS 系统中。

参考文献

[1] 江全元, 彭旭东, 张宝星. PSS/E——一种先进的电力系统分析仿真软件[J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 60-62.
JIANG Quanyuan, PENG Xudong, ZHANG Baoxing. PSS/E——an advanced software package for power system analysis and simulation[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(1): 60-62.

[2] 许逵, 孙婷, 韩松, 等. 考虑运行损耗的故障限流器布点优化和容量选择[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 21-26.
XU Kui, SUN Ting, HAN Song, et al. Optimal sitting and parameter selection for fault current limiter constrained with power losses[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 21-26.

[3] 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.

[4] 叶青, 朱永强, 李红贤. 基于改进遗传算法电力系统仿真软件间模型参数转换研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 95-100.
YE Qing, ZHU Yongqiang, LI Hongxian. Model parameter conversion between power system software based on IGA[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 95-100.

[5] 张跃, 王铃, 潘险险, 等. 基于中间数据库的 PSS/E 与 BPA 数据转换的研究[J]. 广东电力, 2013, 26(6): 21-25.
ZHANG Yue, WANG Qian, PAN Xianxian, et al. Study on PSS/E and BPA data transform based on intermediate database[J]. Guangdong Electric Power, 2013, 26(6): 21-25.

[6] 辛耀中, 米为民, 蒋国栋, 等. 基于 CIM/E 的电网调度中心应用模型信息共享方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 1-5.
XIN Yaozhong, MI Weimin, JIANG Guodong, et al. Scheme of application model information sharing between control centers based on CIM/E[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 1-5.

[7] 郑超, 王贺楠, 刘洪涛, 等. 基于用户自定义程序的 VSC-HVDC 机电电磁混合仿真研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(16): 168-174.
ZHENG Chao, WANG Henan, LIU Hongtao, et al. Study of the electromechanical and electromagnetic hybrid simulation for VSC-HVDC based on PSASP/UIP[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(16): 168-174.

[8] 陈业飞, 李林川, 张芳, 等. 基于节点电流注入法的 UPFC 潮流控制新方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(2): 69-74.

CHEN Yefei, LI Linchuan, ZHANG Fang, et al. Study on novel power flow control method of UPFC based on bus current-injection[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(2): 69-74.

[9] 尹璐, 舒彬, 张璞, 等. 统一潮流控制器在电力系统中的 PSD-BPA 和 MATLAB 联合建模与仿真方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(增刊 1): 383-388.
YIN Lu, SHU Bin, ZHANG Pu, et al. A PSD-BPA and MATLAB joint modeling and simulation method with UPFC for power system flow calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(S1): 383-388.

[10] 李峰, 庄卫金, 王勇, 等. 基于 PSS/E 的可用于调度主站验证的仿真系统设计[J]. 中国电力, 2014, 47(1): 66-70.
LI Feng, ZHUANG Weijin, WANG Yong, et al. PSS/E-based simulation system design for functional verification on the power dispatching automation system[J]. Electric Power, 2014, 47(1): 66-70.

[11] 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.

[12] 于尔铿, 刘广一, 周京阳. 能量管理系统: EMS[M]. 北京: 科学出版社, 1998.

[13] Siemens. PSS®E 33.4 program operation manual[R].

[14] Siemens. PSS®E 33.4 application program interface (API)[R].

[15] 赵震宇, 王喜臣. C/C++ 与 FORTRAN 混合编程技术及其应用研究[J]. 长春科技大学学报, 2001, 31(2): 197-200.
ZHAO Zhenyu, WANG Xichen. Mixed-language programming of C/C++ and FORTRAN and its application[J]. Journal of Changchun University of Science and Technology, 2001, 31(2): 197-200.

收稿日期: 2015-06-08; 修回日期: 2015-08-04

作者简介:

王 勇(1979-), 男, 硕士, 高级工程师, 从事电力系统分析与仿真方面的研究; E-mail: wangyong5@epri.sgcc.com.cn

於益军(1968-), 男, 研究员级高工, 从事电力系统分析与优化控制方面的研究;

李 峰(1976-), 男, 高级工程师, 从事电力系统分析与仿真方面的研究。

(编辑 魏小丽)