

元模式支持下的多平台电力系统仿真模型转换研究

为满足多电力系统仿真平台间计算结果对比分析需要,在对模型数据的结构差异及语义差异分析基础上,面向模型转换的可扩展需求,给出元模式结构,并提出基于元模式的模型转换策略。以PSASP向PSS/E转换为例建立模式库,通过可扩展标记语言(XML)实现对转换元模式的描述,采用面向对象的C++语言编写了基于元模式转换策略的转换接口程序。最后通过仿真验证了单个模型转换和系统模型转换的有效性。

林 俐¹ 张凌云² 李诗童¹ 王世谦³ / 1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室 2. 云南电力调度控制中心 3. 国网河南省电力公司经济技术研究院

0 引言

随着计算机和信息处理技术的迅猛发展,电力系统仿真软件以其优良的经济性和适用性成为研究、分析电力系统的有力工具。然而,由于开发背景、使用目的等方面的不同,造成了国内外常用的电力系统分析软件之间模型数据格式差异较大,不利于各平台间的数据共享和计算结果的对比分析。

目前,电力系统仿真软件间的转换方法通常是针对某几个具体的软件数据来编写相应的模型转换程序。如文献[1-3]应用数学图论中的深度优先搜索等方法,解决了BPA向PSCAD/EMTDC的动态模型转换。文献[4-6]则在比较BPA与PSS/E潮流和暂态模型的基础上,编程实现了两种软件模型及其参数之间的转化。但是这些转换方法及相应编写的模

型转换程序往往仅针对特定的目标软件数据,并不适用于多软件、跨平台间的模型转换,造成程序的通用性和实用性不强。此外,电力系统仿真软件进行版本更新时,由于可能出现的模型修改和模型添加将会导致原先存在的转换关系发生变化,这也给模型转换程序的扩展和维护提出了新的要求。

鉴于以上情况,本文面向多电力系统仿真平台间计算结果对比分析需要,首先在对模型数据的结构差异及语义差异分析基础上,针对模型转换的可扩展需求,给出元模式结构,并据此提出基于元模式的模型转换策略。然后以PSASP向PSS/E转换为例建立模式库,通过可扩展标记语言(XML)实现对转换元模式的描述,并采用面向对象的C++语言编写了PSASP与PSS/E转换接口程序。最后通过仿真验证了单个模型转换和系统模型转换的有效性。

1 基于元模式的模型转换策略

1.1 基于元模式的模型转换思想

不同的模型以及同一模型的不同版本之间的数据结构、类型和功能定义等是有差异的,这些差异可以具体归纳为结构差异和语义差异两个方面。结构差异是指模型比较双方在模型数据项上存在差异,即模型本身组成结构的不同;而语义差异是指模型比较双方在结构基本一致的前提下,模型对应字段属性、长度、格式及准确度等方面的差异。从



林 俐/副教授

关键词/Keywords

元模式·
模型转换·
PSASP·
PSS/E·
XML·

国家自然科学基金重大项目(51190103)、国家高技术研究发展计划(863计划)(2011AA05A104)。

模型转换的角度考虑,模型比较中每一组差异转换关系实际对应一个处理流程,全部处理流程的集合则表现为完整的模型转换过程。

通过总结不同电力系统仿真平台模型的结构差异及语义差异可以发现,具有转换关系的模型属性对应的处理流程虽然不尽相同,但是其中总会存在某些不同模型间不同属性处理流程完全一致的情况,此时可对这些相同的处理流程进行提取,归纳自定义为一种具有统一特定格式的元模式结构,该元模式结构如图1所示。一个典型的元模式由模式编号和模式内容两部分构成,模式内容包括源模型和目标模型的类型及位置,以及该元模式的具体转换运算法则。

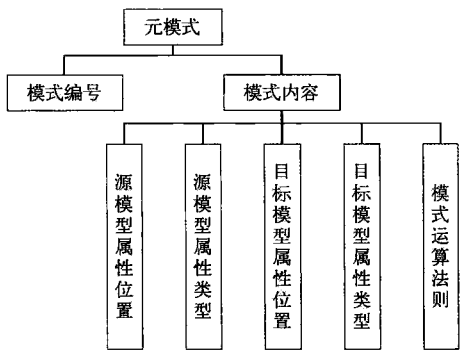


图1 元模式结构示意图

所有的元模式组成模式库,则不同电力系统仿真平台的模型转换策略如图2所示。当需要新的模型转换时,则判断模型属性转换元模式,并与

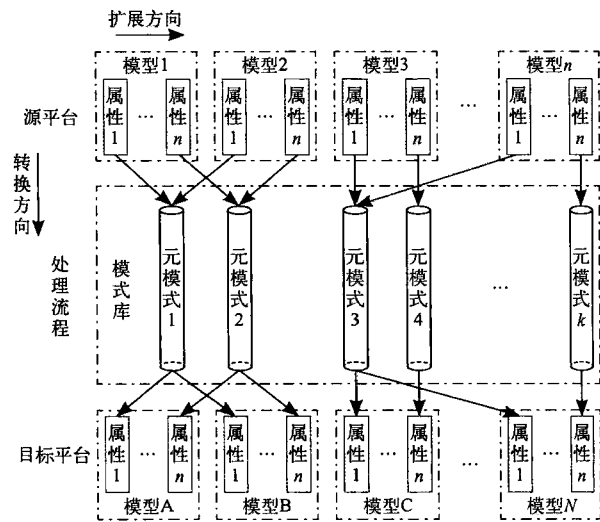


图2 基于元模式的模型转换策略示意

模式库中元模式相比配, 比配结果一致的元模式直接按照库中的已有流程进行, 无比配关系的部分则定义为一个新的元模式, 补充扩展到模式库中。由于库中元模式具有统一的标准格式, 可根据模型的不同转换关系进行添加而具有很强的扩展性, 适用于多电力系统仿真平台间模型的转换^[7]。

1.2 基于元模式的模型转换流程

基于元模式的模型转换流程如图3所示。

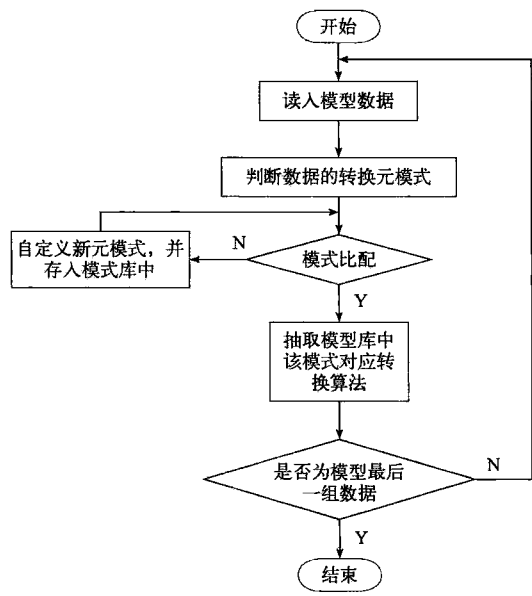


图3 基于元模式的模型转换流程

当读入某组模型数据后, 首先判断该数据属于的转换元模式类型, 然后与模式库中的元模式进行搜索比配, 如果比配到已有元模式, 则抽取模式库中对应转换算法进行数据转换; 如果没有比配到已有元模式, 这时需扩展新的转换元模式, 即自定义建立新的转换元模式及对应处理算法, 并存入模式库中, 然后执行模式比配的过程。如此依次循环往复, 直至所有模型的最后一组数据处理完毕方结束该次转换。

2 PSASP与PSS/E模型转换的实现

2.1 模式库的形成及实现方式

电力系统分析综合程序PSASP是一套功能强大、使用方便、高度集成和开放的大型电力系统

分析程序^[8]。电力系统仿真软件PSS/E是由美国电力技术公司（PTI）开发的商业软件，主要用于电力系统仿真和计算^[9]。研究PSASP与PSS/E间的模型转换，并对结果进行比较分析，能为电网调度、运行和决策等提供更有利的依据。通过分析PSASP与PSS/E所有的模型对应关系，从中总结出了10类典型转换元模式，如表1所示。

表1 模式库典型转换元模式

元模式编号	内容简化描述
1	对数据项作乘法、除法、指数运算及取绝对值运算等数值计算转换
2	数据项一对一转换，二者间无须进行转换计算
3	对数据项按照目标类型进行格式化
4	实现变压器或发电机电阻抗值与导纳值间的换算
5	输入数据标签值为0时，放弃对当前数据项的转换，并取默认设定值
6	特定用于处理比较复杂的包含幂指数运算的多项式计算转换关系
7	特定用于两种同步发电机饱和特性模拟参数间的转换
8	判断当前模型数据是否符合限制条件，若超出允许范围，则停止进行转换，并进行报错处理
9	特定用于感应电动机有功负荷率的计算及转换
10	特定用于处理励磁调压器饱和和特性数据多对一的转换关系

考虑元模式的扩展性需求，本文采用高度结构化的可扩展标记语言（XML）编写转换元模式描述文档，实现了元模式结构的标准化。XML文档是一种由节点构成的段分层纯文本文件，其内容由标签间的嵌套关系组成^[10-12]。下面以表1中的元模式1为例进行具体阐述，该元模式的具体转换内容为：一个或多个PSASP模型数据需要经过简单数值计算后方可转换为PSS/E中的模型数据，其XML描述文档树结构如图4所示。

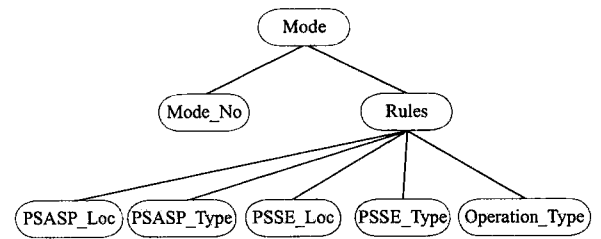


图4 元模式1的XML描述文档树结构

元模式1在图4中最外围的“Mode”标签为根

节点，根节点下包括若干组标签。“Mode_No”标签具体指明该元模式编号，在“Rules”标签下的5个子标签分别说明了输入数据参与转换数据的位置及类型、输出数据的位置及类型和参与的运算类型信息，主程序则通过识别这些信息调用相关转换算法，进而实现该元模式的计算转换功能。

2.2 模型转换程序设计

这里以PSASP向PSS/E转换为例，采用面向对象的C++语言编写了基于元模式转换策略的转换接口程序。图5为该模型转换程序结构图。

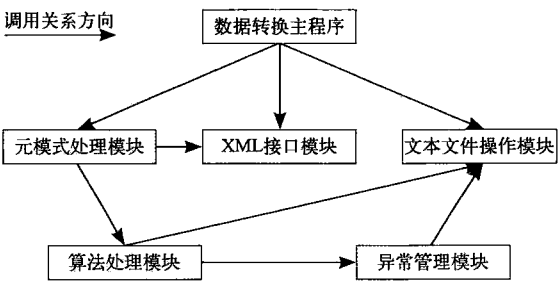


图5 模型转换程序结构

图5中，数据转换主程序作为最高层次的核心模块，通过调用文本文件操作模块和XML接口模块实现待转模型数据及元模式XML描述文档的读入，然后按照给定逻辑循环关系，将每组模型对应关系交由算法处理模块。

元模式处理模块主要功能是识别模型数据的转换元模式，并将处理结果有序分配到各对应算法模块中。

XML接口模块负责元模式处理模块同元模式XML描述文档的连接，处理同XML文件相关的解析操作。

文本文件操作模块与算法处理模块存在主调用关系，主要功能为元模式识别处理后文本文件的相关操作，包括目标文件的读写、保存和指定内容查找等。

算法处理模块集合了所有元模式对应的转换算法，根据建立的逻辑运算关系对具体的模型数据进行转换。

异常管理模块负责对程序出现异常或误操作情况进行记录和纠正，提高程序的容错能力。

3 算例仿真验证

3.1 单模型仿真验证

为了验证基于元模式的转换程序的有效性和准确性,这里采用单机无穷大系统进行单模型对比分析,并以6阶发电机模型为例进行验证。单机无穷大系统接线图如图6所示。

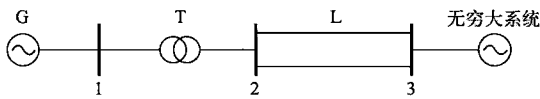


图6 单机无穷大系统接线

具体参数如下。

发电机G: $S_N = 130 \text{ MV}\cdot\text{A}$, $P = 100 \text{ MW}$, $U = 1.02$, $X_d'' = 0.35$, $X_q'' = 0.35$, $X_d' = 0.7$, $X_q' = 0.85$, $X_d = 1.6$, $X_q = 1.55$, $T_J = 2 \text{ s}$, $D = 0$, $T_{d0}'' = 0.06$, $T_{q0}'' = 0.06$, $T_{d0}' = 5.0$, $T_{q0}' = 0.2$ 。

无穷大系统: $S_N = 9\,999 \text{ MV}\cdot\text{A}$, $T_J = 9\,999 \text{ s}$, $D = 2.0$ 。

变压器T: $R_T = 0.000\,21$, $X_T = 0.085$, $T_K = 1.0$ 。

输电线L: $R_L = 0.005$, $X_L = 0.045$, $B_L = 0.08$ 。

以上参数中,未标明单位的均为标么值。其中系统基准容量为 $100 \text{ MV}\cdot\text{A}$,系统频率为 50 Hz 。

系统中发电机G采用6型汽轮机(隐极机)6阶暂态模型,无穷大系统则采用0型2阶暂态模型进行模拟。在潮流计算结果一致的情况下,设置扰动为:1 s时在母线2处发生三相短路,0.1 s后故障清除。图7~图10为仿真结果。

由图7~图10可见,两款软件的计算结果比较接近,发电机主要参数的初始值、振荡幅度、振荡趋势及趋稳时间等监测指标误差均处在工程允

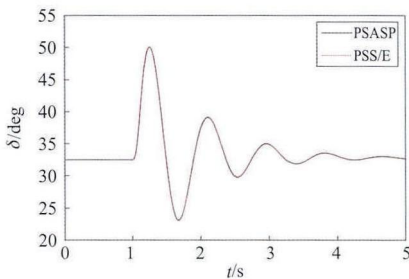


图7 发电机G功角曲线

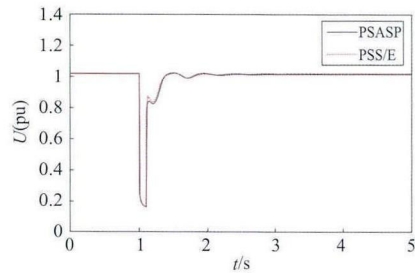


图8 发电机G机端电压曲线

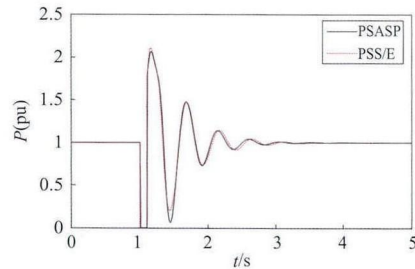


图9 发电机G有功出力曲线

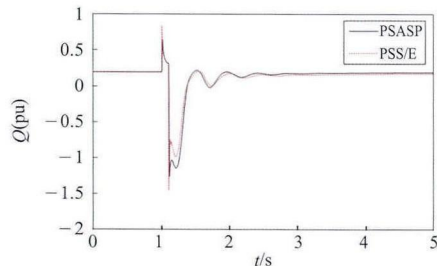


图10 发电机G无功出力曲线

许范围内,表明转换程序有效实现了该系统模型的对对应转换。

3.2 基于CEPRI-36节点系统的仿真验证

这里采用CEPRI-36节点系统验证多个模型转换的有效性,系统接线图如图11所示。

(1) 稳态模型转换验证

表2列举了该系统潮流计算结果母线电压幅值相差最大的前10个节点。

从表2中数据对比可以看出,母线电压幅值最大误差仅为0.02%,两款软件的潮流结果误差很小,满足误差要求。

(2) 动态模型转换验证

该系统模型设置如表3所示。

设置扰动为:1 s时在母线BUS30处发生三相短路,0.1 s后故障清除。这里以距故障点由近及远原则选取发电机G5和G1的有功出力及机端电压

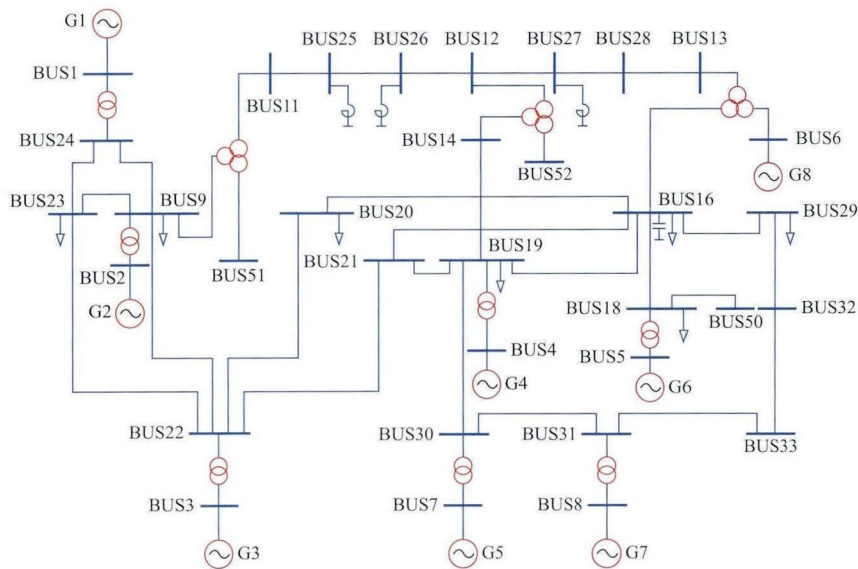


图11 CEPRI-36节点系统接线图

表2 CEPRI-36节点系统潮流计算结果比较

母线	电压幅值(pu)		电压相角/deg	
	PSASP	PSS/E	PSASP	PSS/E
BUS34	0.991 4	0.991 6	-41.513 0	-41.436 6
BUS29	0.991 4	0.991 6	-41.528 4	-41.436 6
BUS13	1.001 0	1.001 2	-38.277	-38.195 8
BUS18	0.994 7	0.995 0	-41.532 5	-41.455 6
BUS50	0.994 7	0.995 0	-41.532 5	-41.455 6
BUS16	0.991 4	0.991 6	-41.513 5	-41.436 6
BUS5	1.033 3	1.033 5	-31.824 2	-31.751 3
BUS20	1.002 6	1.002 8	-37.965 9	-37.904 1
BUS27	1.011 7	1.011 8	-31.195 1	-31.131 2
BUS11	1.019 5	1.019 7	-23.789 1	-23.787 6

表3 CEPRI-36节点系统模型设置

母线	发电机模型	调压器模型	调速器模型
BUS1	6型	—	—
BUS2	3型	1型	—
BUS3	3型	1型	1型
BUS4	6型	1型	—
BUS5	3型	1型	—
BUS6	3型	1型	—
BUS7	3型	2型	—
BUS8	3型	2型	1型

为监测量进行研究，其对比结果如图12~图15所示。

由图12~图15可见，两款软件的计算结果振

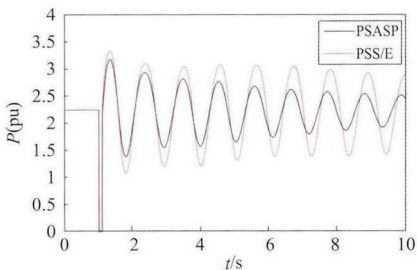


图12 发电机G5有功出力曲线

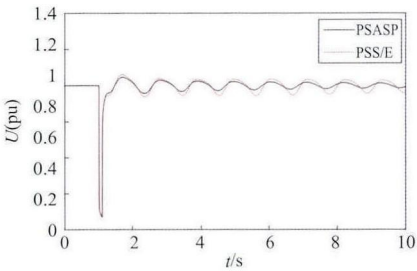


图13 发电机G5机端电压曲线

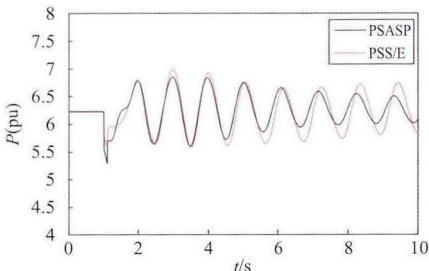


图14 发电机G1有功出力曲线

荡周期及趋势基本一致，幅值略有差异，其标么值误差基本小于0.1，在3个周波内的特性基本相

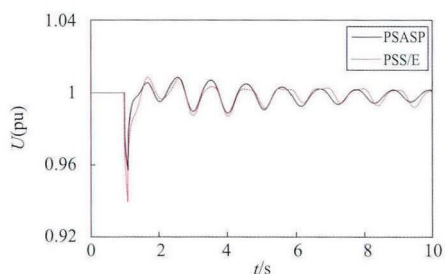


图15 发电机G1机端电压曲线

近,满足短时间暂态稳定误差要求。由于PSASP和PSS/E对励磁调压器及调速器的动态模拟不完全一致,微小的模型差异经过积分放大后导致后续误差增大,造成3个周波以后的动态特性误差较为明显,这些误差不是由于模型转换造成的误差。因此,该转换程序能较好地实现PSASP和PSS/E间模型转换,满足电力系统运行分析比较的工程要求。

4 结束语

本文阐述了基于元模式的跨平台模型转换策略,并通过仿真验证了单个模型转换和系统模型转换的有效性,表明开发的转换接口程序能准确地实现PSASP与PSS/E模型转换,为各平台间仿真结果的分析比较提供参考。

参考文献

- [1] 张民,贺仁睦,许津津,等.图论在BPA模型向PSCAD模型自动转换中的应用[J].电网技术,2012(6).
- [2] 陶华,许津津,邹文聪.BPA向PSCAD模型转换的研究[J].电力自动化设备,2013,33(8):

152-156.

- [3] 陶华.BPA向EMTDC/PSCAD模型转换方法的研究[D].北京:华北电力大学,2009.
- [4] 马龙义.BPA与PSS/E仿真模型分析与转换研究[D].广州:华南理工大学,2010.
- [5] 杨茹.BPA-PSS-E模型对比计算研究及数据接口程序开发[D].北京:华北电力大学,2006.
- [6] 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.
- [7] 金涛,褚福亮,李威,等.基于改进HHT算法的电力系统低频振荡模态辨识研究[J].电气工程学报,2015,10(6):58-66.
- [8] 电力系统分析综合程序用户手册(6.1版)[G].北京:中国电力科学研究院,2001.
- [9] Program Operation Manual of PSS/E-31[G].America:PTI Inc.,December,2007.
- [10] He Z M, Fan X L, Liang Y. Application of XML information exchange technology in remote-vision data transmission of power system[C]. Advances in Power System Control, Operation and Management (APSCOM 2009), 8th International Conference on, IET, 2009: 1-4.
- [11] 兰涛.基于自定义模式的PSS/E与PSASP模型转换与仿真对比[D].北京:华北电力大学,2014.
- [12] Anbalagan, Malarvizhi, Ponmagal. An XML data representation model for power system reliability assessment[J]. Industrial and Information Systems (ICIIS), 2010 International Conference on, 2010: 458-462.

(收稿日期:2015-07-06) EA

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告