

# 基于对象 Petri 网的电力系统软件体系结构描述

李书勇<sup>1</sup>, 宋玮<sup>2</sup>

(1. 中国南方电网超高压输电公司广州局, 广东 广州 510405; 2 华北电力大学电气工程学院, 河北 保定 071003)

**摘要:** 把 Petri 网原理和面向对象技术相结合, 定义一种对象 Petri 网。运用这种对象 Petri 网对可复用的电力系统软件体系结构进行描述。这种对象 Petri 网有面向对象技术的自然性和封装性, 有严格的数学描述和直观图形表示; 通过库所和变迁的连接关系及变迁触发、有色托肯的流动, 能清晰、有效地描述可复用电力系统软件体系结构中不同层次的主体属性、行为及彼此间的信息交互、包含与被包含等的关系。它既能反映该体系结构中组件等主体间的静态联系, 又能精确、方便地描述主体间的异步、并发等动态行为。

**关键词:** 对象 Petri 网; 软件体系结构; 电力系统

**中图分类号:** TM73      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2005)23-0064-04

## 0 引言

软件体系结构的描述要反映系统中的组件及其信息交互的过程、组件内部的组成及信息流的变化等。体系结构描述语言 ADL (Architecture Description Language) 是形式化描述软件体系结构的基本工具, 也是对软件体系结构进行求精、验证和分析的基础。UML 语言是目前流行的面向对象分析语言, 它有一套完整的规范来支持视化、建模、说明和建档, 也有相应的软件开发工具支持; 但没有严格的数学描述。

Petri 网是一种描述离散事件系统的图形与数学工具, 既有图形表示的直观性, 又有数学表达的严密性, 既能描述静态的组成结构又能反映动态的信息流, 能方便描述异步、并发等行为。而对于一个复杂的大系统, 如能量管理系统, 用传统的基本 Petri 网系统描述, 会发生状态空间爆炸, 因此必须使用高级有色 Petri 网系统, 才能有效控制网状态空间。文章综合有色 Petri 网系统和面向对象思想的优点定义一种对象 Petri 网, 用于对文献 [1, 2] 提出的可复用电力系统软件体系结构进行描述。其基本思想就是把系统映射为不同层次的相互关联的库所的集合, 不同层次的库所对应不同层次的对象实体 (组件或者类对象), 通过库所间变迁触发和有色托肯的流动来反映信息的传递, 达到精确描述软件系统的目的。

## 1 对象 Petri 网

### 1.1 对象 Petri 网的数学定义

**定义 1:**  $\sum = (P_i, T_i, F_i, M_0)$ ;  $P_i = (P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{ij}, \dots, P_{in})$ ,  $T_i = (t_{i1}, t_{i2}, \dots, t_{ij}, \dots, t_{in})$

式中:  $\sum$  是一个多层网系统,  $P_i$  表示第  $i$  层的库所集, 即第  $i$  层行为主体  $P_{ij}$  ( $j = 1, 2, \dots, n$ ) 的集合,  $P_{ij}$  可能是组件或类对象。  $T_i$  是第  $i$  层的变迁集,  $F_i$  表示第  $i$  层的流集, 即有色托肯在第  $i$  层的路径集合。  $M_0$  表示第  $i$  层的网系统初始状态, 即第  $i$  层库所的有色托肯标识向量。

**定义 2:**  $P_{ij} = (st, at, op, C_{pij}, CC, hc)$ ;  $st$  表示  $P_{ij}$  的状态, 有激活态、等待状态和不可用态,  $at$  为该库所属性  $at_i$  的集合, 其中包括该库所的唯一标识  $D$ ,  $op$  为该库所的操作  $op_i$  的集合。如果库所对应为类对象, 则  $C_{pij}$  对应它的类,  $cc$  表示库所对应类  $C_{pij}$  所组合的类的集合,  $hc$  表示库所对应类  $C_{pij}$  所继承的父类集合。如果库所对应为组件, 则  $C_{pij}$ 、 $cc$ 、 $hc$  可缺省。

**定义 3:**  $T_{ij} = (id, af, ff)$ ,  $id$  是变迁的唯一标识,  $af$  表示变迁触发引起有色托肯流向的层次。变迁触发, 可引起有色托肯在同一层次间流动, 也可引起托肯在不同的层次间流动。  $ff$  表示变迁的约束函数集合, 组件对象间的变迁一般有虚拟接口函数等约束函数。

### 1.2 对象 Petri 网的图形表示

对象 Petri 网的图形表示分为对象图表示和类图表示。对象图表示主要直观描述库所 (包括组件和类对象) 间的信息交互和包含等关系。类图表示主要反映某个组件内类的继承、组合等关系, 类图表示是对象图表示的补充。

#### 1.2.1 对象 Petri 网的对象图表示

一个基本的库所用一个两层的矩形框表示, 上层标有库所名, 下层内有属性集合  $at$  和操作集合  $op$ 。变迁用“ $\rightarrow$ ”或“ $\leftarrow$ ”表示。“ $\rightarrow$ ”说明变迁的约

束函数集合为空。库所和变迁之间用有向线连接,箭头的方向就是消息发送的方向。“ $\cap$ ”和“ $\cup$ ”

中变迁前的两个有向线是“或”关系,只要其中之一有有色托肯流动,变迁就可以触发。库所中的“ $\cap$ ”表示有色托肯,不同状态下的有色托肯表示不同的流信息,op集合中不同的 $op_i$ 由不同色的有色托肯驱动,有色托肯的流动由变迁触发引起,有色托肯的流动改变库所的状态。

如图 1,  $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 、 $P_{13}$ 分别为第一层的三个库所,  $P_{21}$ 、 $P_{22}$ 表示第二层的 2 个库所,其中  $P_{22}$ 为主动库所,用@标示,  $t_{11}$ 、 $t_{12}$ 、 $t_{13}$ 、 $t_{14}$ 、 $t_{15}$ 为第一层的 5 个变迁,前 4 个变迁的触发引起有色托肯在本层内流动;变迁  $t_{15}$ 的触发则使有色托肯流向下一层。第二层中,变迁  $t_{21}$ 、 $t_{22}$ 触发引起有色托肯在本层内流动,变迁  $t_{23}$ 触发使有色托肯向上一层的库所流动。此图中只有  $p_{11}$ 含有有色托肯,故  $M_{10} = (1, 0, 0)^T$ 。

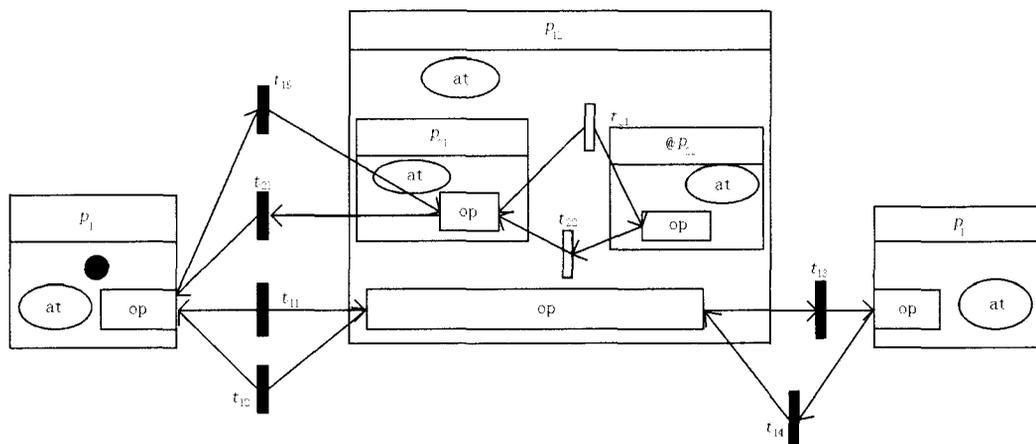


图 1 对象 Petri网的对象图表示

Fig 1 Object schematic diagram of object-oriented Petri nets

对象 Petri网运行时,初始标识中含有有色托肯的库所处于激活态,有色托肯驱动该库所的相应操作;相应操作将产生新的有色托肯,操作完成,相应的变迁触发,发生消息传递,即新的有色托肯流向其他库所,从而改变相关的库所状态。这就是对象 Petri网的动态过程。

### 1.2.2 对象 Petri网的类图表示

这里的类图表示主要用来描述某个组件内类的继承、组合等关系,其表示方法主要参照文献 [9] 的类图表示,并作一些简化。

如图 2(a),库所  $P_{21}$ 对应的类  $C_{p21}$ 与库所  $P_{22}$ 、 $P_{31}$ 对应的类  $C_{p22}$ 、 $C_{p31}$ 是被继承与继承的关系。如图 2(b),库所  $P_{34}$ 对应的类  $C_{p34}$ 与库所  $P_{41}$ 对应的类  $C_{p41}$ 是整体类与部分类的关系。

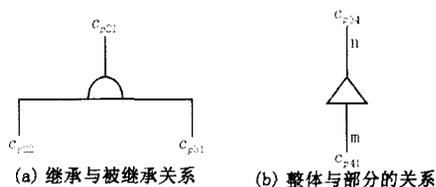


图 2 对象 Petri网类图表示

Fig 2 Class schematic diagram of object-oriented Petri nets

## 2 电力系统应用软件体系结构的对象 Petri网描述

### 2.1 组件层描述

体系结构组件层的对象 Petri网描述实际是第一层的描述,图 3主要针对静态安全分析过程进行描述,其中  $P_{11}$ 为图形界面库所,  $P_{12}$ 为静态安全分析库所,  $P_{13}$ 为电力系统基础计算库所,它们表示对应

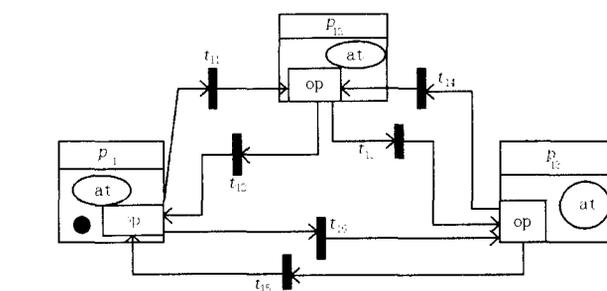


图 3 组件层的对象图表示

Fig 3 Object schematic diagram of OOPN for component layer

的功能组件。当调度员要进行静态安全分析,图形界面的安全分析功能键就会被摁动,  $P_{11}$ 就会有一个有色托肯,即该库所处于激活态。接着变迁  $t_{11}$ 触发,有色托肯流向  $P_{12}$ ,  $P_{12}$ 被激活运行;同时变迁  $t_{12}$ 触发,有色托肯流向  $P_{13}$ ,  $P_{13}$ 被激活,从数据库提取

数据信息进行结线分析、潮流计算等。 $P_{12}$ 运行过程中,变迁  $t_3$  触发,发送需要的数据类型等消息, $P_{13}$ 出现有色托肯,即得到这些信息后,变迁  $t_4$  触发, $P_{12}$ 被激活接收其需要的信息。 $P_{12}$ 运行得出预想事故排序结果后,变迁  $t_2$  触发, $P_{11}$ 被激活,显示排序结果;同时变迁  $t_3$  再次触发, $P_{13}$ 被激活进行详细潮流计算,详细潮流计算结果出来后,变迁  $t_5$  触发, $P_{11}$ 被激活,显示详细潮流计算结果。

2.2 基础计算组件的描述

基础计算组件的描述属于整个体系结构中的第二层描述,图 4 中库所  $P_{13}$  对应基础计算组件,在这里只关心它的潮流计算功能,因此对它的短路计算等内容忽略不提,图 3 中的  $t_6$  或  $t_3$  触发后,  $op_1$  操作就会读取电力系统拓扑数据库,获取发电机、变压器、输电线路的端点号和阻抗值等以及断路器、刀闸的开合状态等;接着  $t_2$  触发,  $op_2$  进行母线分析;进而  $t_2$  触发,  $op_3$  进行网络分析,划分子系统;然后  $t_3$  触发,潮流计算动态链接库即库所  $P_{23}$  被激活,使用快速解耦一次迭代或者完整的快速解耦法求解潮流。潮流计算完成,  $t_4$  触发,  $op_4$  操作是对结果按要求临时存储,经  $t_4$  或  $t_5$  触发发送出去。这是整个体系结构中基础计算组件的第二层描述,对于更加具体的潮流计算过程,要由第三层的潮流计算库所  $P_{21}$  具体描述。

2.3 静态安全分析组件内类对象的对象 Petri网图表示

图 5 是对图 3 中的静态安全分析库所  $P_{12}$  进行细化描述,其中  $P_{22}$  为故障集合库所,  $P_{23}$  为故障扫描

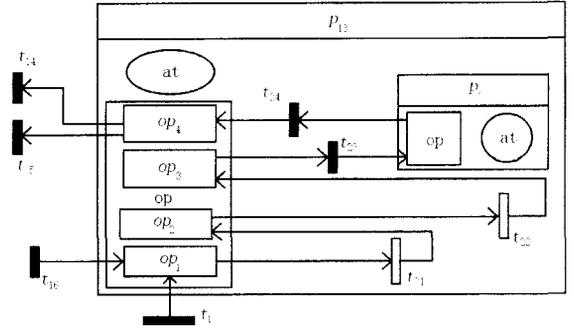


图 4 潮流计算的对象图表示

Fig 4 Object schematic diagram of OOPN for load flow calculation

库所,  $P_{31}$  为故障组 1 库所,  $P_{3i}$  为故障组  $i$  库所,  $P_{41}$ 、 $P_{4i}$  是  $P_{3i}$  内的故障库所。 $P_{23}$  的操作集合  $op$  中,  $op_1$  为解列性判别操作,  $op_2$  为预筛选排除无害故障操作,  $op_3$  为指标计算操作,  $op_4$  为故障排序操作。

开始时,  $t_{11}$  触发,有色托肯流向  $P_{12}$  并驱动其  $op$  集中的某一操作,此操作完成有色托肯经  $t_{25}$  触发激活故障集合库所  $P_{22}$ ;同时,  $t_{13}$  触发,发送故障筛选所需数据类型信息激活基础计算库所  $P_{13}$  进行基态潮流计算,即有色托肯流向  $P_{13}$ 。 $P_{22}$  的操作集合  $op$  内的某操作函数完成,  $t_3$  触发,有色托肯激活某故障组库所  $P_{3i}$ ;  $P_{3i}$  的某一操作完成,  $t_4$  触发,有色托肯流向故障库所  $P_{4i}$ ,即选择了该故障。进而有有色托肯通过  $t_6$  触发流向  $P_{23}$ ,激活  $P_{23}$  进行  $op_1$  操作,判断故障是否为解列性故障。若是解列性故障,有色托肯则会通过  $t_3$  触发流向基础计算库所  $P_{13}$ ,激活  $P_{13}$  进行详细潮流计算;若不是解列性故障,且  $t_{54}$  和  $t_{44}$  触发,

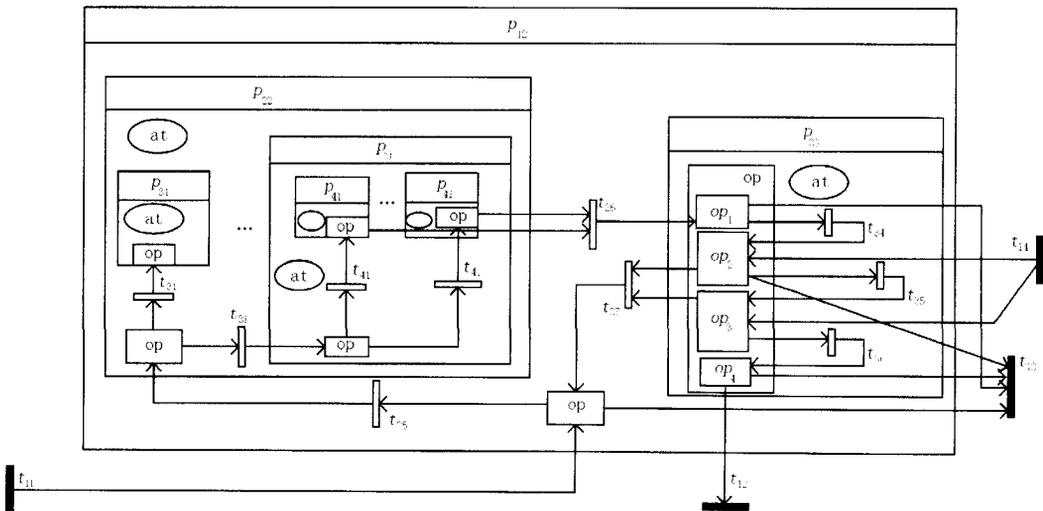


图 5 静态安全分析组件的对象 Petri网对象图表示

Fig 5 Object schematic diagram of OOPN for steady security analysis component

则进行预筛选操作  $op_2$ 。若故障的有害性被排除,则  $t_7$  触发,要求选取下一个故障;否则,  $t_3$  触发,有色托肯激活基础计算库所  $P_{13}$  进行该故障下的快速解耦一次迭代运算,同时  $t_5$  触发,要求进行指标计算,当  $t_4$  再次触发后送来此故障下一次迭代的有关潮流信息后进行指标计算操作  $op_3$  并保留结果,计算完成之后才通过  $t_7$  触发,选取下一个故障。如此循环直至故障集中所选的故障都经过故障扫描,  $t_6$  触发,  $op_4$  进行指标排序,得到按指标运算值的大小排序的有害故障后,  $t_2$  触发,界面组件库所  $P_{11}$  显示有害故障;同时  $t_3$  触发,  $p_{13}$  对故障顺序表中的严重故障进行详细潮流计算。

### 3 小结

这种用于对可复用电力系统软件体系结构描述的对象 Petri网,具有面向对象技术的自然性,具有 Petri网的严格数学描述和直观图形表示的特点。能清晰、有效地描述不同层次的主体的属性、行为及彼此间的信息交互、包含与被包含等的关系,即通过库所、变迁的连接关系反映软件体系结构中组件等主体间的静态联系,通过变迁触发和有色托肯在库所间的流动,反映主体间信息的信息交互,精确地描述系统的异步、并发等动态行为。

这种对象 Petri网能够为软件体系结构进行求精、验证和分析提供很好的方法。但要像 UML 那样得到广泛认可,还需要进一步的研究,并开发支持这种方法的相关软件平台。

#### 参考文献:

- [1] 李书勇,宋玮.一种基于复用组件的电力系统软件体系结构[J].继电器,2005,33(2):39-42  
LI Shu-yong, SONG Wei A Power System Software Architecture of Reusable Component-based [J]. Relay, 2005, 33(2): 39-42
- [2] 邓健,宋玮.面向可复用体系结构的潮流计算和故障计算软件的实现[J].电网技术,2004,28(22):71-75.  
DENG Jian, SONG Wei Implementation on Software for Load Flow Calculation and Fault Calculation Based on Reusable Architecture [J]. Power System Technology, 2004, 28(22): 71-75.

- [3] 于振华,蔡远利.基于面向对象 Petri网的软件体系结构描述语言[J].西安交通大学学报,2004,38(12):1236-1239,1275.  
YU Zhen-hua, CAI Yuan-li Software Architecture Description Language Based on Objectoriented Petri Nets [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(12): 1236-1239, 1275.
- [4] 王振宇,况银瓶,陈利.软件体系结构讲座( )软件体系结构的语言问题[J].计算机与数字工程,2000,28(1):54-68  
WANG Zhen-yu, KUANG Yin-ping, CHEN Li Lectures on Software Architecture: ( ) Linguistic Issues Related to Software Architecture [J]. Computer and Digital Engineering, 2000, 28(1): 54-68.
- [5] 乐晓波,汪琳,虞清.面向对象的 Petri网建模技术的研究[J].计算机工程,2002,28(5):86-88  
YUE Xiao-bo, WANG Lin, TUO Qing Research on Object-oriented Petri Net Modeling [J]. Computer Engineering, 2002, 28(5): 86-88.
- [6] Sakis Meliopoulos A P, Cheng C S, Xia Feng Performance Evaluation of Static Security Analysis Methods [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3).
- [7] Gustavson K, Tom A. Objectoriented Token: a Way of Increasing the Modeling Power of Simulation Nets [A]. Proceedings of the European Simulation Symposium. 1994.
- [8] Frey G, Litz L. Verification and Validation of Control Algorithms by Coupling of Interpreted Petri Nets [A]. Proceedings of the IEEE SMC98 San Diego: 1998. 11-14.
- [9] 邵维忠,杨芙清.面向对象的系统分析[M].北京:清华大学出版社,广西科学技术出版社,2000.  
SHAO Wei-zhong, YANG Fu-qing Analysis on Object-oriented System [M]. Beijing: Tsinghua University Press and Guangxi Science and Technology Press, 2000.

收稿日期: 2005-04-08; 修回日期: 2005-06-10

#### 作者简介:

李书勇(1979-),男,硕士,研究方向为电力信息分析与处理;E-mail: oliver0057@tom.com

宋玮(1962-),男,副教授,研究方向为电力软件和电力信息分析与处理。

### Describing electric power system software architecture based on object-oriented Petri Nets

LI Shu-yong<sup>1</sup>, SONG Wei<sup>2</sup>

(1. Guangzhou Bureau, EHV Power Transmission Company of China Southern Grid, Guangzhou 510405, China;

2. School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

(下转第 72 页 continued on page 72)

们前面分析所担心的,为此,我们决定根据分析寻出根源,根据以上分析,现场组织试验专业人员特别对变电所地网电阻进行测量,试验的结果很让我们兴奋,试验中发现变电所地网电阻果然不合格而且是严重不合格,特别地点接地电阻已达到 7 左右,正是这次录波电压畸变的症结所在,正是我们这次分析判断的结论所在。

## 5 结论及要求

造成地网电阻严重不合格的主要原因是新建变电所时,由于地质原因地网电阻安装不合格,施工人员使用了大量的降阻剂,随着时间的积累和降阻剂的腐蚀,地网电阻之间的联络钢筋开始锈蚀断裂,导致地网各点之间电阻不一致,然后就出现了上述特殊故障分析过程,所以在这里特别提醒各运行单位局厂注意地网电阻的检查,避免保护误动、拒动事故的发生。

### 参考文献:

[1] 王梅义. 电网继电保护应用 [M]. 北京:中国电力出版

社, 2001.

WANG Mei-yi Application of Protective Relaying in Power Sysrtem [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2001.

[2] 邹森元. 《电力系统继电保护及安全自动装置反事故措施要点》条例分析 [M]. 北京:中国电力出版社, 2005.

ZOU Sen-yuan Regulations Analysis of Power System Relay Protection and Anti-incident Measures for Its Auto-devices [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.

收稿日期: 2005-04-18; 修回日期: 2005-06-08

### 作者简介:

邓卫民 (1975 - ),男,助理工程师,从事继电保护运行维护工作; E-mail: ddd9202@163.com

孙扩业 (1973 - ),男,工程师,从事变电运行管理工作;

周宏宇 (1974 - ),男,硕士,高级工程师,从事继电保护运行管理工作。

## Analysis of an unusual system fault

DENG Wei-min, SUN Kuo-ye, ZHOU Hong-yu, WU Li-gang, LI Zeng-ren, RUAN De-jun, HU Xiao-yong  
(Hegang Electric Power Bureau, Hegang 154101, China)

**Abstract:** Since most of maloperation of protection equipment in the power system are caused by the disturbance of the secondary circuit system, the paper analyses the wrong setting and wiring of the secondary circuit including arc discharge gap or zinc oxide valve of the VT secondary winding, direct two-point earthing of the PT secondary winding and the disconnection failure of N lines of secondary and third winding of PT. A conclusion is reached that the disturbance of secondary circuit does not cause the operation change of protection equipments. To remind the site operation and maintenance organization of attaching importance to inspection of the earthing system, it also points out that relay protection engineers only pay attention to secondary circuit but ignore the effect of the primary circuit on protection equipments.

**Key words:** system fault; wave analysis; disturbance voltage; power direction

(上接第 67 页 continued from page 67)

**Abstract:** Combining Petri Nets principle with object-oriented technology, define a kind of object-oriented Petri Nets which used to describe the reusable power system software architecture. The OOPN keeps the main characters of object-orientation, such as naturalness and encapsulation, and also acquires the Petri Nets characters such as rigid mathematics describing and intuitionistic graphics express. With the relation between place and transition, transition firing and stream of color token, OOPN can clearly and availably depict the attributes and operations of object, information intercommunication between objects and containing relations of different layers' objects in the reusable power system software architecture. OOPN can reflect objects' static relation in the architecture, but also can precisely and easily depict the asynchronous and concurrent dynamic behaviors among objects.

**Key words:** object-oriented Petri Nets; software architecture; electric power system