

# Petri网描述的继电保护动作逻辑时序建模

朱林, 蔡泽祥, 刘为雄

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

**摘要:** Petri网理论具有完善的理论证明依据,是离散动态系统建模的有效工具。该文基于 Petri网理论,介绍了一种新的继电保护建模思路。保护装置可以看成是一个离散动态系统。利用 Petri网中并行、冲突、资源分享等特性,对继电保护中的动作逻辑演化及二次回路动态进行描述,建立了保护装置的 PN 模型。最后就 RCS - 901A/B 超高压线路成套保护装置进行了工作原理分析和性能评估,证明了所提方法的有效性。

**关键词:** Petri网; 离散动态系统; 电力系统二次回路; 继电保护建模

**中图分类号:** TM77      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2005)20-0009-05

## 0 引言

继电保护是保证电力系统安全运行的关键。目前,对继电保护的主要研究成果集中在用于模拟继电保护的逻辑仿真以及外特性的模拟上,还有一些研究则是侧重于仿真具体保护和控制装置的内部算法及故障诊断上<sup>[1~4]</sup>。但现有的用于电力系统分析和研究的商业化软件或实时仿真系统如 EMTP/EMDC、NETOMAC、RIDS、HYPERSM 等缺少对继电保护模型的系统化整体描述。对保护系统的动态行为,通常采用基于事先已定的假设指定动作状态的处理方法,其缺点是无法真实地反映继电保护元件的控制规律,尤其是对于保护的误动(拒动)所引发的级联故障。

Petri网理论经过多年发展,已经成为混杂系统建模的重要工具之一,在计算机通信和自动控制等方面得到广泛应用<sup>[5~7]</sup>。国内已经有不少学者以 Petri网理论为工具,进行混杂电力系统建模<sup>[8]</sup>、电力系统故障诊断<sup>[9,10]</sup>等方面的研究。文献[11]扩展了 Petri网理论,利用 Petri网简单考察了继电保护的动态行为及装置的可靠性,但涉及的研究对象简单,文献[12]延续了文献[8]的建模思路,将继电保护装置的动作为系统离散状态逻辑层的变化加以考察,描述了逻辑动作过程,但缺乏评估标准。

由于 Petri网具有并行(Parallelism)、并发(Concurrency)、同步(Synchronization)、资源分享(Resource Sharing)等特点,易于建立离散动态系统的形象化模型,而且理论结果十分丰富<sup>[13~15]</sup>。本文正是基于该理论,建立描述继电保护连续动态和控制等

离散动态的 PN 模型。这种保护的软模型可以展现继电保护装置的动作为逻辑时序过程,有助于研究保护动作与电力系统之间的混杂行为,同时对继电保护的工作原理和性能定性评估有实际意义。

## 1 时序 Petri网

### 1.1 时序 Petri网定义

时间是系统物理层的一个重要参数,建立包含时间因素的系统分析模型对实际系统来说是非常必要的。随着电力系统的庞大与复杂,在连续动态和离散事件相互作用及其对系统影响的展现方式等方面,也提出了新的要求。

在引入时序概念的 Petri网中,规定了变迁具有有限  $d_i$  的引发时延(称为 T-timed);库所与一个时限  $d_i$  相联系(称为 P-timed)。时序 Petri网被定义为:  $\langle R, \text{Tempo}(t, p), \text{Time} \rangle$ , 其中  $\text{Tempo}(t, p)$  表示为变迁集和库所集的时延函数;  $\text{Time}$  表示系统时钟;  $R = (P, T, F, M_0)$  为一普通 Petri网,  $P$  为库所集合,  $T$  为变迁集合,  $F \subseteq P \times T \cup T \times P$  ( $\times$  是两集合的笛卡儿乘积运算),  $M_0$  表示系统的初始状态。

在时序 Petri网的表示标记上,区分于普通变迁与库所,将延时变迁用加粗竖线表示;对于延时库所,其中的处于无效状态的 token 用空心黑点表示,处于有效状态的 token 则用实心黑点表示。

### 1.2 时序 Petri网发生规则

1) 一个时延变迁满足其护卫函数后,一旦使能则立即引发。

2) 对每一个时延变迁,引发有一个时延过程,  $\text{Tempo}(t_i)$  是从变迁集  $T$  到非负有理数集的函数,  $\text{Tempo}(t_i) = d_i$ , 一个时延变迁从激发开始,经过时间  $d_i$  后,变迁激发结束。

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目(04020015)

3) 时延库所中的标记存在有效的 (available)、无效的 (unavailable) 两种状态。

4)  $\text{Tempo}(p_i)$  是库所集  $P$  到非负有理数集的函数,  $\text{Tempo}(t_i) = d_i$ , 当一个标记被置入延时库所  $P_i$  位置时, 在库所  $P_i$  至少停留时间  $d_i$ , 在这个时间段中, 标记不可用, 经过  $d_i$  后, 标记转为可用。

5)  $\text{Time}$  表示系统时钟集合。采用时间映射方式的事件表驱动法: 将连续时间离散化, 依照事件发生的顺序, 放入与时间序列相对应的事件序列中。在时间序列上每前进一格, 取出该时刻的所有事件, 演化事件的影响。其链表的结构如图 1 所示。

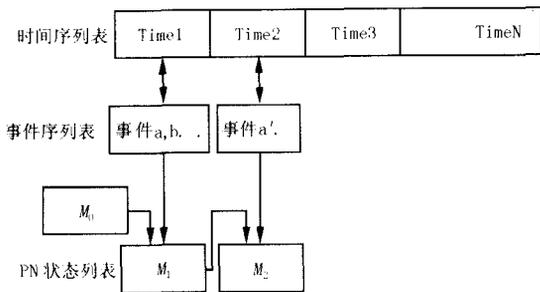


图 1 链表结构

Fig 1 Chain structure

### 1. 3 时序 Petri网代数分析方法

为了便于引入代数方法对 Petri网进行分析, 采用矩阵来表示网结构, 用向量来描述网的状态。对一个确定的 Petri网, 网结构可以用关联矩阵  $C = [C_{ij}]_{m \times n}$  表示, 其中  $m = |P|$ ,  $n = |T|$ , 并且

$$c_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{若 } P_j \text{ 是 } t_i \text{ 的输入库所} \\ -1 & \text{若 } P_j \text{ 是 } t_i \text{ 的输出库所} \\ 0 & \text{否则} \end{cases} \quad (1)$$

PN 的一个状态  $M$  可以用一个非负整数  $m$  维向量表示 ( $M(i) = M(p_i)$ )。若  $T^*$  为一变迁序列,  $X$  为发射序列的发射向量,  $M, M'$  分别为 Petri网 PN 的两个可达状态, 且  $M' \geq M$ ; 则称方程 (2) 为 Petri网状态方程。

$$M' = M + CX \quad (2)$$

时序 Petri网模型, 根据发射向量  $X$ , 在确定可达状态的同时也确定该状态上的时间标签。

### 1. 4 时序 Petri网的推理方法

逻辑关系有如下 3 种形式: IF  $P_1$  AND  $P_2, \dots$  AND  $P_n$  THEN  $T_i$ , 这种形式 (逻辑与) 可以表述为一个具有多个输入位置的变迁 IF  $T_1$  or  $T_2, \dots$  or  $T_n$  THEN  $P_i$ , 这种形式 (逻辑或) 可以表述为一个具有

多个变迁作为输入的库所。逻辑非, 可以用抑止弧表示。如图 2 所示。

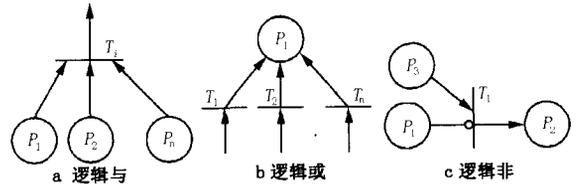


图 2 逻辑关系

Fig 2 Logic relation

在引入概率因素后, Petri网不仅可以进行知识的表达和处理, 而且具有处理模糊变量的能力, 可以进行协调控制层的知识表示和推理。图 2(b) 中  $T_i$  的引发概率  $P_{Ti} = \prod_{i=1} P_i$  ( $P_i$  为第  $i$  个输入库所中存在有效托肯的概率); 图 2(c) 中  $P_i$  中存在有效托肯概率  $P_{Pi} = 1 - \prod_{i=1} P_i$  ( $P_i$  为第  $i$  个变迁的引发概率)。

## 2 继电保护的时序 Petri网模型

系统故障的出现与消除、断路器的动作、继电器线圈的重置等事件, 可以驱动系统状态的改变。因此保护装置可以看成是一个离散动态系统。用 Petri网的动态演化推理过程对继电保护装置工作原理、二次时序逻辑回路动态描述, 应包含两个层次:

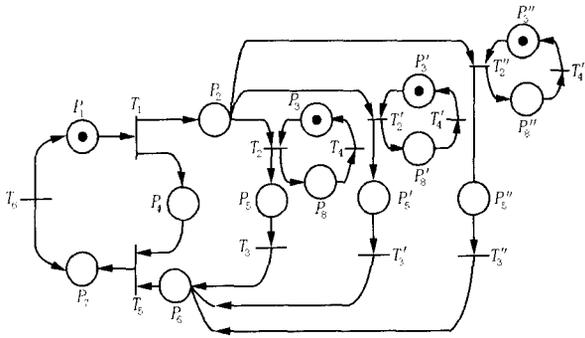
- 1) 普通 Petri网所描述的逻辑演化;
- 2) 由系统时钟集合  $\text{Time}$  所描述的动态演化。

以在 35 kV 及以下的较低电压网络中得到广泛应用的过电流保护为例。电流继电器作为实现电流保护的基本元件, 也是反应于一个电气量而动作的简单继电器的典型。将通过继电器线圈的电流记为  $I_j$ , 起动电流记为  $I_{dzj}$ , 返回电流记为  $I_{hj}$ 。在系统正常运行状况下  $I_j < I_{dzj}$ , 继电器不动作; 如电力系统出现短路故障, 电流迅速增大, 当满足  $I_j \geq I_{dzj}$  时, 继电器能迅速动作, 闭合触点; 在继电器动作以后, 当电流减小到  $I_j \leq I_{hj}$  时, 继电器又能立即返回原位, 触点重新打开。这是一个典型的离散动态系统, 其 PN 模型如图 3 所示。

在图 3 所示模型中, 用库所来表示系统或元件的状况, 用变迁来表示事件, 根据电力系统、保护设备的初始情况, 在对应库所中放入托肯, 可以得到初始标记  $M_0$ 。

$M_0 = [1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0]^T$  表示电力系统处于正常运行的工况下, 三段式过电流保护装置正确配置。

图 3 所示的 PN 模型, 描述了以下几点内容:



注:库所  $P_1$  至  $P_8$  分别表示为:系统正常运行状况,继电器感测到故障,电流速断继电器,系统故障(不正常运行)状况,动作信号,故障隔离,系统待恢复状况,继电器动作。 $P'_3$ 和  $P'_3$ 为限时电流速断继电器和过电流继电器。变迁  $T_1$ 至  $T_6$ 分别代表:出现故障,电流速断继电器响应,二次回路响启动作命令,继电器重置,清除故障,系统恢复。 $T'_2$ 和  $T'_2$ 为限时电流速断继电器响应和过电流继电器响应。

图 3 三段式过电流保护 PN模型

Fig 3 PN model of three-section overcurrent relay

- 1) 存在 3 个子网,分别对应保护的三段配置。
- 2)  $T_2$ 、 $T'_2$  和  $T_2$  的变迁时延,区分电流速断继电器响应、限时电流速断继电器响应和过电流继电器响应。
- 3) “电力系统出现故障”作为驱动事件,使系统由正常运行工况  $M_0$  变为故障状况  $M_1$ 。即  $T_1$  的护卫函数为真 ( $I_f \geq I_{dz,1}$ )时,经  $d_1$  延时后  $T_1$  触发,  $P_1$  失去 token,而  $P_4$  得到 token。
- 4) 系统进入故障运行状况,正确配置的继电保护装置探测到系统所出现的故障,并迅速反应动作。即  $P_4$  得到 token,  $P_2$  同时也得到 token,继电器反应于发生的故障。
- 5) 电流继电器反应于一次回路中的故障,其线圈开始充电,改变相应的辅助触点状态,发出跳闸信号,使断路器动作,从而形成隔离故障信息。即随着  $T_2$ 、 $T_3$  相继触发, token 从  $P_2$  转移到  $P_6$ 。
- 6) “隔离故障”事件,驱动系统的状态由故障运行状况改变为待恢复正常运行状况。即  $T_5$  触发,  $P_6$  失去 token,  $P_7$  得到 token。
- 7) “系统恢复”事件,驱动系统的状态变为正常运行状况。即  $T_6$  触发,  $P_7$  失去 token,  $P_1$  得到 token。
- 8) “继电器恢复”事件,使继电器重新配置,处在待响应故障状况。即  $T_4$  触发,  $P_8$  失去 token,  $P_3$  得到 token。
- 9) 在引入时间参数后,故障一旦发生,要求继电器能迅速反应,则要满足下面的约束条件:

$$d_4 < [d_2 + d_3 + d_5 + d_6 + d_1] \quad (3)$$

上述模型清晰描述了三段式过电流保护的工作原理。但继电保护工作原理及各种算法众多,针对这种状况,有待设计更合适的状态观测器,为 Petri网模型提供初始状况及护卫函数条件。这方面的工作,将在他文中另做研究。

### 3 模型实例

下文以 RCS - 901A / B 超高压线路成套保护装置中距离保护为例,给出逻辑原理图和二次回路的 PN模型,并进行相关性分析。

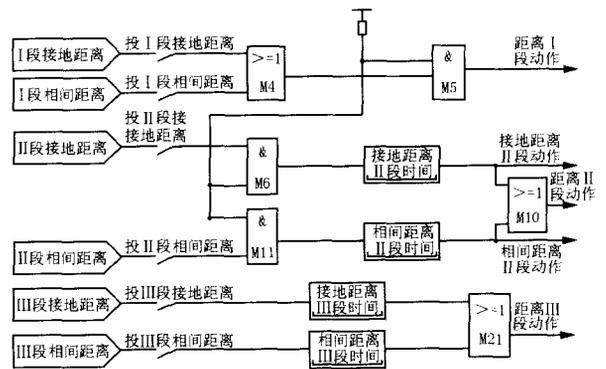
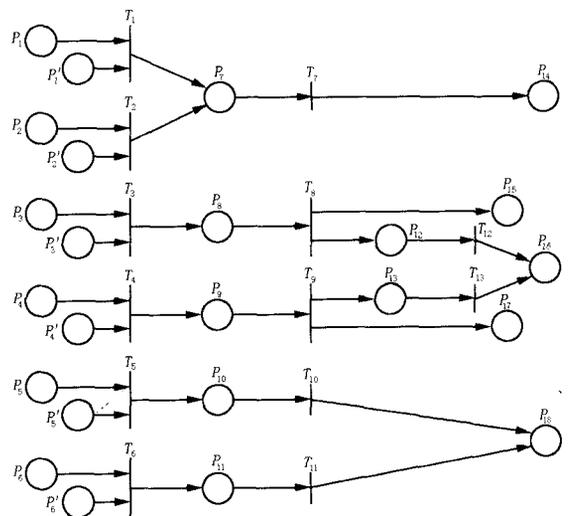


图 4 RCS - 901A / B 距离保护逻辑原理图

Fig 4 Schematic diagram of RCS - 901A / B distance protection logic



注:  $P_1 \sim P_6$  分别表示该距离保护中 I、II、III 段继电器状况;  $P'_1 \sim P'_6$  分别表示 I、II、III 段控制字投入状况。 $P_{14} \sim P_{18}$  分别表示各段的动作命令。 $T_8 \sim T_{11}$ : 由 ( ) 段时间延时事件驱动的延时变迁。

图 5 RCS-901A / B 距离保护 PN模型

Fig 5 PN model of RCS-901A / B distance protection

模拟在 I、II、III 段均动作状况下,距离保护的



态演化过程。而继电保护动作结果与电力系统影响及相关的故障诊断问题,在文献[9,10]中已有较详细介绍。这方面的内容,本文在此不再重复。

#### 4 结论

本文以 Petri网理论为依据,扩展了继电保护建模思路。给出了描述保护系统动态的 PN 模型,并对模型的可达状态及性能进行了分析。利用这种方法,以 RCS - 901A/B 超高压线路保护为例,模拟了其工作原理和动作逻辑时序结果,展现了继电保护系统二次回路的动态过程。需要注意的是随着现代大规模电力系统的发展,采用 Petri网所建的模型将出现“状态维数爆炸”的问题,会导致模型的状态树不可达。有待继续进行的工作是要分析实际保护系统中存在的隐患(随机事件),设计合适的状态观测器,研究可以描述混杂动态的电力系统随机 PN 模型,用于分析实际电力系统的连锁故障。同时对 Petri网做进一步改进,完善其表达和解算能力。

#### 参考文献:

- [1] 赵晓坦,苏鹏声.离散序列小波变换在微机继电保护中的应用[J].继电器,2002,30(10):37-40.  
ZHAO Xiao-tan, SU Peng-sheng The Application of Discrete Wavelet Transform in Microprocessor Based Protection of Power System[J]. Relay, 2002, 30(10): 37-40.
- [2] 邹俊雄,蔡泽祥,孔华东.基于图形平台的电力系统继电保护动作逻辑仿真[J].电力系统自动化,2002,26(8):61-64.  
ZOU Jun-xiong, CAI Ze-xiang, KONG Hua-dong, et al The Operation Logic Simulation of Relay Protection of Power Systems Based on Graphic Platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(8): 61-64.
- [3] 林集明,郑健超,吴承琦,等. TCSC的基本控制与过电压保护数字仿真[J].电力系统自动化,2000,16(8):26-28.  
LIN Jiming, ZHENG Jian-chao, WU Cheng-qi, et al Digital Simulation of Basic Control and Overvoltage Protection for TCSC[J]. Automation of Electric Power System, 2000, 16(8): 26-28.
- [4] 高厚磊,文锋,王广延,等.两种多相补偿阻抗继电器动作性能的数字分析[J].继电器,1995,23(3):3-9.  
GAO Hou-lei, WEN Feng, WANG Guang-yan, et al Computer Aided Analysis for Performance of two Types Distance Relays with Multi-phase Compensation[J]. Relay, 1995, 23(3): 3-9.
- [5] Giua A, Usai E. Modelling Hybrid Systems by High-Level Petri Nets[J]. European Journal of Automation APIE

- JESA, 1998, 32: 1209-1231.
- [6] 肖兵,瞿坦,王明哲.着色 Petri网及其在系统建模与仿真中的应用[J].计算机工程,2001,27(1):30-33.  
XIAO Bing, QU Tan, WANG Ming-zhe Applying Colored Petri Net in System Modeling and Simulation[J]. Computer Engineering, 2001, 27(1): 30-33.
- [7] 何贤会,高春华,王慧.基于混杂 Petri网的混杂系统建模方法[J].机电工程,2000,17(2):69-72.  
HE Xian-hui, GAO Chun-hua, WANG Hui Hybrid Petri Nets Based Modeling of Hybrid Dynamic Systems[J]. Mechanical and Electric Engineering Magazine, 2000, 17(2): 69-72.
- [8] 赵洪山,米增强,牛东晓,等.利用混杂系统理论进行电力系统建模的研究[J].中国电机工程学报,2003,23(1):20-25.  
ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, NU Dong-xiao, et al Power System Modeling Using Hybrid System Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 20-25.
- [9] 孙静,秦世引,宋永华.一种基于 Petri网和概率信息的电力系统故障诊断方法[J].电力系统自动化,2003,27(13):10-14,23.  
SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Yong-hua A Fault Diagnosis Method for Power Systems Based on Petri Nets and Probability Information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(13): 10-14, 23.
- [10] 孙静,秦世引,宋永华.模糊 Petri网在电力系统故障诊断中的应用[J].中国电机工程学报,2004,24(9):74-79.  
SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Yong-hua Fuzzy Petri Nets and Its Application in the Fault Diagnosis of Electric Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 74-79.
- [11] Jenkins L, Khincha H P. Deterministic and Stochastic Petri Net Models of Protection Schemes[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1992, 7(1): 84-90.
- [12] 王晓冬,米增强,赵洪山.基于 Petri网技术的继电保护建模研究[J].华北电力大学学报,2004,31(2):20-23.  
WANG Xiao-dong, MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan Model Research of Protective System Based on Petri Nets Theory[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(2): 20-23.
- [13] 蒋昌俊. Petri网理论与方法综述[J].控制与决策,1997,12(6):631-636.  
JIANG Chang-jun Research Survey on Theories and Methods of Petri Net[J]. Control and Decision, 1997, 12(6): 631-636.

(下转第 18 页 continued on page 18)

- LU Qing The Theories and the Methods for Multi-agent System Used in Power System, Doctoral Dissertation [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1997.
- [3] 陈月从, 林俐, 等. 基于 Web 的跨平台图形化继电保护运行管理系统的研究 [A]. 电力系统及其自动化专业第十九届学术年会论文集. 成都: 2003. 950-954.  
CHEN Yue-cong, LN Li, et al Research of Web-based Graphic Relay Protection MIS [A]. Proceeding CUS-EP-SA. Chengdu: 2003. 950-954.
- [4] 王威, 张沛超, 等. 面向对象的继电保护日常运行操作专家电力系统的运用 [J]. 继电器, 2001, 29 (9): 23-26  
WANG Wei, ZHANG Pei-chao, et al Application of Object-oriented Expert System in Relay Protection Routine [J]. Relay, 2001, 29 (9): 23-26.
- [5] 王永庆. 人工智能原理与方法 [M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1998.
- WANG Yong-qing Theories and Methods of Artificial Intelligence [M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1998.
- [6] CHEN Yue-cong, LN Li, GAO Shu, et al Research on Operation DSS of Relay Protection [A]. Regional Inter-university Postgraduate Electrical and Electronic Engineering Conference (R UPEEEEC). 2003.

收稿日期: 2005-01-10; 修回日期: 2005-03-31

作者简介:

王利 (1975 - ), 女, 硕士研究生, 研究方向为人工智能在电力系统中的应用; E-mail: wanglilzb@163.com

林俐 (1968 - ), 女, 讲师, 研究方向为电力系统自动化及继电保护;

陈月从 (1979 - ), 女, 助工, 研究方向为电力系统自动化及继电保护。

### Study on web-based graphic relay protection operation decision-making expert system

WANG Li<sup>1,2</sup>, LN Li<sup>1,2</sup>, CHEN Yue-cong<sup>1,2</sup>, GAO Shu<sup>1,2</sup>, GUO Ya-cheng<sup>3</sup>, SHI Yao-zhao<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control, Ministry of Education,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China;

2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 3. Baoding Power Supply Company,

Baoding 071000, China; 4. Beijing Sifang Relay Protection and Autocontrol Co., Ltd, Beijing 100085, China)

**Abstract:** This paper introduces a web-based graphic relay protection operation decision-making expert system. It develops controllable graphic user interface using the JSP dynamic web technique and the graphic, industrial control and network function of Wizcon industrial control platform. This system also combines the object-oriented representation and the producing representation to realize an independent repository and details the class of relay protection knowledge and its advantages to the system realization.

**Key words:** power system; relay protection; operation decision-making; ES

(上接第 13 页 continued from page 13)

- [14] David R, Orlando H. 佩特利网和逻辑控制器图形表示工具 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.

David R, Orlando H. Graphics Representative Instrument of Petri Net and Logic Controller [M]. Beijing: China Machine Press, 1996.

- [15] 袁崇义. PETRI 网 [M]. 南京: 东南大学出版社, 1989.

YUAN Chong-yi Petri Net [M]. Nanjing: Dongnan University Press, 1989.

- [16] 陶然. 继电保护自动装置及二次回路 [M]. 北京: 水利电力出版社, 1992.

利电力出版社, 1992.

TAO Ran Relay Protection Auto Equipment and Its Secondary Circuit [M]. Beijing: Hydraulic and Electric Power Press, 1992.

收稿日期: 2005-01-17; 修回日期: 2005-04-18

作者简介:

朱林 (1979 - ), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护安全与监控; E-mail: zhulin1979@vip.sina.com

蔡泽祥 (1960 - ), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统继电保护, 电力系统稳定与控制的教学和研究工作。

### Model on the logic working procedure of relay schemes based on timed Petri net

ZHU Lin, CAI Ze-xiang, LU Wei-xiong

(Electric Power College, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** The Petri net is efficient to model DEDS (discrete event dynamic systems) due to its full-developed theories. This paper proposes a method of timed Petri nets for relay schemes modeling. A relay scheme is one of the discrete event dynamic systems. Using the parallel, impacting, resource-sharing characteristics of Petri net, the logic working procedures with secondary loop dynamics are described. The working principle and performance of RCS-901A/B are comprehensively studied and evaluated with the proposed method to demonstrate its effectiveness.

This project is supported by National Natural Science Foundation of Guangdong Province (No. 04020015).

**Key words:** Petri net; discrete event dynamic systems; secondary loop; model of relay schemes