

# 微机保护动作逻辑建模与动态分析

戴志辉, 王增平

(华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省保定市 071003)

**摘要:** 针对目前保护逻辑图绘制软件只有显示作用而没有微机保护所需的逻辑动作透明化分析功能的不足, 在混杂系统概念的基础上, 建立了新的基于可编程赋时 Petri 网(PTPN)的继电保护动作逻辑准混杂模型。扩展了基于赋时 Petri 网和矢量图元的保护逻辑元件库及逻辑分析模块, 开发了图形化保护逻辑分析平台, 可应用于保护动作过程回放和保护逻辑程序的调试, 满足动态显示和保护逻辑分析等要求。以距离保护中振荡闭锁开放判据为例, 验证了该模型的正确性和可靠性。

**关键词:** 准混杂模型; 继电保护逻辑; 动态分析; 赋时 Petri 网

**中图分类号:** TM774

## 0 引言

国际上对混杂系统的研究在应用方面已经取得一些进展, 利用混杂系统理论来研究电力系统动态描述、分析及控制等问题方兴未艾。在混杂系统或混杂控制系统的研究中, 自动机理论的发展最为广泛<sup>[1-3]</sup>。Petri 网模型可视为有限自动机的扩展, Petri 网的标识规则更善于处理系统的复杂过程, 且能对混杂系统内部的冲突进行建模<sup>[4-6]</sup>。在微机保护逻辑中, 由于时间元件的存在, 使其成为既具有连续变量动态行为, 又具有离散事件变量动态行为以及这 2 种行为相互的作用, 但由于保护逻辑在时间尺度上的动态行为并不复杂, 这里认为它是一种“准混杂系统”。另一方面, 基于图形化平台实现数据信息可视化分析是电力上层应用系统的发展趋势<sup>[7-9]</sup>。但遗憾的是, 目前用于逻辑图绘制和保护上层分析软件只有逻辑量显示作用, 没有微机保护所需要的逻辑动作透明化的分析功能。因此, 有必要开发一种能够满足微机保护逻辑动作的动态分析软件系统。

本文提出基于可编程赋时 Petri 网(PTPN——programmable timed Petri nets)保护动作逻辑分析系统, 可提供图形化平台, 实现面向保护动作逻辑的过程仿真与分析, 可满足继电保护事故分析、故障回放、保护调试等方面的要求。

## 1 基于 PTPN 的保护逻辑模型及其数据结构和算法

Petri 网  $N=(P, T, I, O)$  用于描述电力系统离散事件的逻辑动态行为时, 其中: 库所  $P$  表示电力

系统模式集合; 变迁  $T$  为电力系统事件集合; 输入弧  $I$  为连接库所与变迁的弧, 表示当前运行模式与将要发生事件之间的关系; 输出弧  $O$  为连接变迁与库所的弧, 表示当前发生的事件与下一个系统模式之间的关系。在实际中, 一个事件的发生往往需要一个时间过程, 所以定义有时间概念的 Petri 网为 PTPN<sup>[6]</sup>。设 PTPN 变迁  $t$  触发的时间区间为  $[\tau_0, \tau_f]$ , 该区间成为变迁的持续时间。在持续时间内, Petri 网的标识保持不变, 只有当变迁触发完成时刻  $\tau_f$ , Petri 网的标识才发生变化。根据不同的时间作用性质, 可分成多种 PTPN, 其中 Melin 的 PTPN 对每个变迁定义一对非负的实数, 表示变迁使能后的最早发生时间和最晚发生时间, 这一点符合保护逻辑中常用的 3 种时间元件的特性。

保护逻辑中逻辑元件的动态取决于所规定的逻辑特性, 用非线性时变微分代数方程来描述:

$$\dot{w}_r = f_r(w_r, u_r, s_r) \quad (1)$$

$$0 = g_r(w_r, u_r, s_r) \quad (2)$$

$$z_r = h_r(w_r, u_r, s_r) \quad (3)$$

式中:  $w_r$  为状态变量;  $u_r$  为逻辑元件的输入;  $s_r$  为动作定值(主要针对时间元件);  $f_r$  描述逻辑元件的物理动态特性;  $g_r$  表示逻辑元件动作的约束函数; 输出  $z_r$  由函数  $h_r$  产生。

本文将微机继电保护动作逻辑准混杂模型表示为一个 6 元组:  $N, X, l_P, l_T, l_I, l_O$ 。其中元素  $l_P: P \rightarrow \ell, l_T: T \rightarrow \ell, l_I: I \rightarrow \ell, l_O: O \rightarrow \ell$  分别表示 Petri 网的库所、变迁、输入弧和输出弧到逻辑命题的合式公式的映射,  $\ell$  为所有合式公式的集合<sup>[10]</sup>,  $N$  为普通 Petri 网。  $X = \{x_1, x_2, \dots, x_s\}$  为局部时钟集合, 元素  $x_i$  的状态  $J_i(t)$  可表示为:

$$J_i(t) = (x_i(t), \dot{x}_i(t)) \quad (4)$$

式中： $\dot{x}_i(t) : \mathbf{R}^n \rightarrow \mathbf{R}^n$  为  $\mathbf{R}^n$  上一个 Lipschitz 连续的自同态，用来刻画第  $i$  个局部时钟的动态变化。

对于延时元件可实现如下：

$$l_{ITime} : \dot{x}_i = \frac{u_{time}}{\tau_{set}} \tag{5}$$

式中： $u_{time}$  为输入状态； $\tau_{set}$  为设定的时间常数。

模型又分为 2 个层次：一是 Petri 网描述的逻辑层，二是局部时钟  $X$  描述的连续动态层。逻辑层的切换由约束函数  $l_P, l_T, l_I, l_O$  确定。以判断振荡停息的判据  $l_I(Oscill, SStabRet)$  为例：6 种相别的Ⅲ段阻抗元件、判断静态稳定破坏的 A 相电流元件和辅助零序电流启动元件连续 4.5 s 返回。 $l_I(Oscill, SStabRet)$  定义为：

$$l_I(Oscill, SStabRet) = (Z_m > Z_{III}) \cap (I_A < I_{JW}) \cap (I_0 < I_{0QD}) \cap (t > T_{return} = 4.5) \tag{6}$$

表示为 PTPN 形式如图 1 所示。

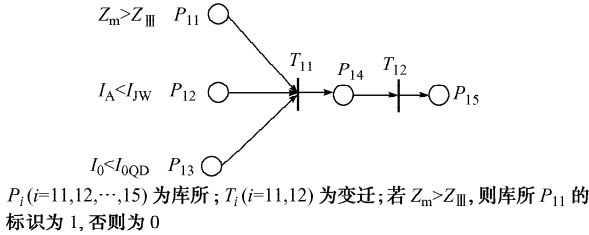


图 1 振荡停息的 PTPN 定义

Fig. 1 Criterion of oscillation resting based on PTPN

变迁  $T_{14}$  使能后的等待发生时间为  $T_{return}$ 。本文的库所表示各种逻辑量。用库所中的托肯指明各个元件的状态。这样利用变迁节点的触发机制，就能够描述和研究保护逻辑的动态行为。变迁集合  $T = \{\text{逻辑与, 逻辑或, 逻辑非, 时间延迟}\}$ 。

2 保护逻辑图元件库

保护动作逻辑图形绘制的关键是建立包含逻辑元件图形和属性数据的逻辑图元库。矢量图形文件中的图形元素即图元称为对象，每个对象都是一个自成一体的实体，具有颜色、形状、轮廓、大小和屏幕位置等属性。可以在维持原有清晰度和弯曲度的同时，多次移动和改变它的属性。基于上述特性，本文以矢量图形作为逻辑图显示模块的绘图形式。

绘制逻辑图所需要的图元主要包括：逻辑输入（主要指启动元件、方向元件等）、逻辑输出、与门、或门、非门、时间元件、逻辑直线等。软件中把它们各自封装，为了进行逻辑运算，又将这些图元分为库所类和变迁类，保护逻辑元件库总体框架见图 2。

在编辑模型时，一旦调用图形，该图形所描述的数学模型，包括输入、输出以及输入与输出之间的逻辑关系便自动产生。

辑关系便自动产生。

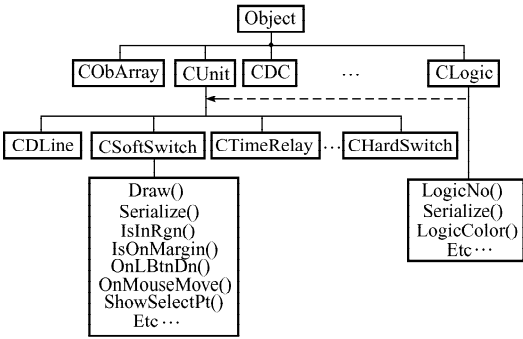


图 2 总体框架  
Fig. 2 General frame

3 通用化微机保护逻辑分析平台

微机保护装置往往配置了一系列的主后备保护，对应每一类保护功能有其相应的动作逻辑，并要求在进行逻辑分析时能有图形化的显示平台。本文提出的动作逻辑图形化平台各模块间的关系如图 3 所示。

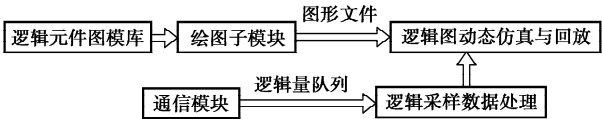


图 3 通用化保护逻辑分析平台总体框架  
Fig. 3 Framework of relay protection flows analysis

3.1 通信与逻辑数据处理模块

目前微机保护装置可存储一定量的故障报告、启动报告等，考虑到录波文件中逻辑量信息一般按位保存，平台首先将逻辑量记录部分从具有标准 COMTRADE 格式的故障报告中分离，然后将按位表示的逻辑量还原为便于程序处理的动态数组形式。

3.2 逻辑图动态显示

抽取逻辑量记录以后，一方面可以进行动态分析，下文详述；另一方面，可以在逻辑图上动态显示各个时刻逻辑量的变化情况，逻辑图中对于逻辑量的 2 种不同状态，相应地用不同的颜色表示，不仅可以纵向观察不同时刻各逻辑量的状态，在横向上，同一时刻各逻辑量之间的关系也一目了然，较好地解决了传统的基于折线显示逻辑量的不足。

由于受普通绘图软件绘图范围的限制，以方向纵联保护为例，一般按逻辑关系分为保护未启动逻辑、启动后逻辑及出口跳闸逻辑等模块，分别绘制逻辑图，各成一张，这给整体逻辑分析带来不便。而本平台可以在很大范围内设置滚动范围以便把保护逻辑集中反映到一张图上，既实现每个图元的无级缩

放,又可以全图缩放,形象地展示保护的启动、动作、出口、返回的整个逻辑处理过程。

### 3.3 逻辑图动态分析主要算法流程

动态分析系统的整体算法流程如图 4 所示:遍历每一个输入节点,将输入节点的值送入到它所连接的元件的输入端,若此时输入个数满足该元件设定个数,则调用该元件的 PTPN 功能函数计算该元件的输出端的值,再将该输出端的值送入它的下一个连接元件并判断下一个元件的输入是否满足条件,如此循环,直到输出节点。若此时不满足元件输入条件,则遍历下一个输入节点。

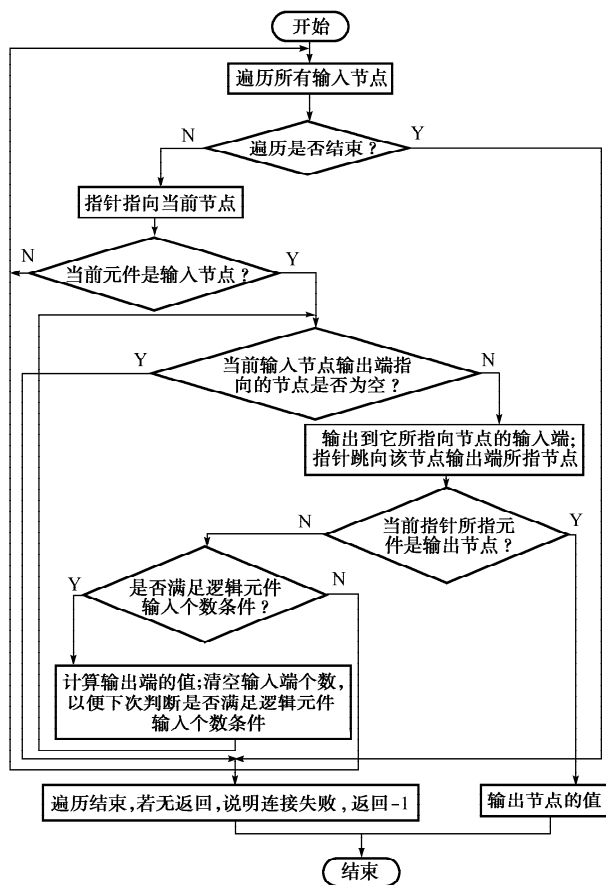


图 4 软件算法流程

Fig. 4 Flow chart of software algorithm

## 4 微机保护逻辑内部动态仿真分析与模型验证

以距离保护中振荡闭锁开放判据为例,逻辑图和对应的 Petri 网模型如图 5 所示,该逻辑图包括了各种逻辑元件:输入输出、延时动作瞬时返回时间元件、瞬时动作延时返回时间元件、与门、或门、非门、软压板。以条件“非全相振荡闭开放”、“静稳破坏元件动作”、“保护启动”作为输入进行逻辑仿真分析。其中 T1,T2 为两个时间元件,P 为库所,T 为变迁,实

心圆表示托肯。

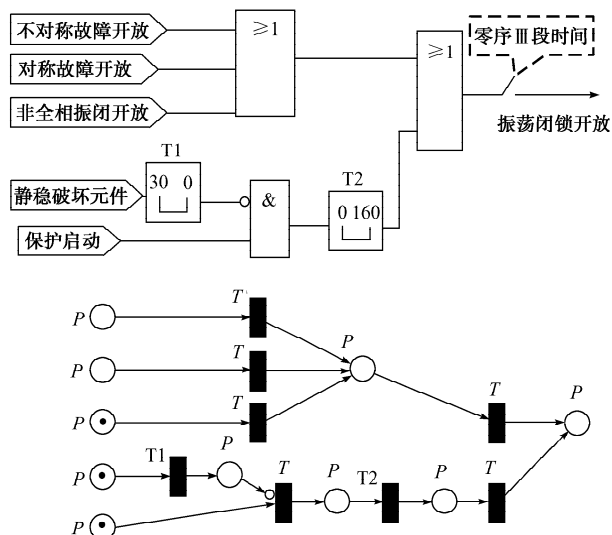


图 5 振荡闭锁开放逻辑图及对应的 Petri 网

Fig. 5 Logic diagram and Petri net of surge guard opening

图 6~图 8 列出了动态仿真过程中的关键画面,因为时间继电器 T1 和 T2 存在延时或展宽,所以输入“非全相振荡闭开放”,无延时产生输出“振荡闭锁开放”(不考虑零序Ⅲ段时间),如图 6 所示。软件中还有按照式(5)设计的计时系统。

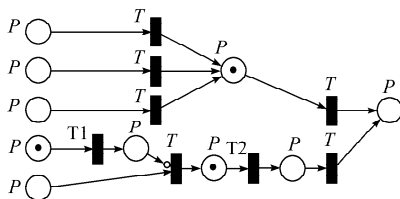


图 6 显示第 1 帧

Fig. 6 Step 1 of the simulation display

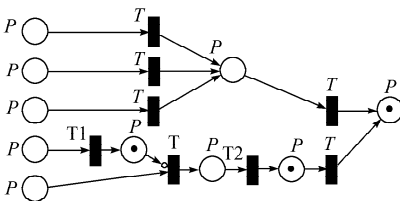


图 7 显示第 2 帧

Fig. 7 Step 2 of the simulation display

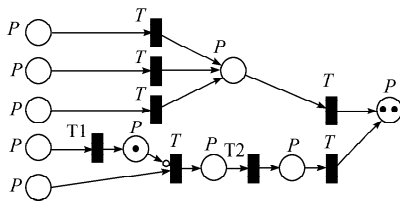


图 8 显示第 3 帧

Fig. 8 Step 3 of the simulation display

需要说明的是,在系统上显示的图 6~图 8 是一个动态过程,图中所示仅为其中关键的 3 步。

本平台还可分析所有可能的输入对应的输出情况,限于篇幅,如图 9 显示了部分可能的输入和对应的输出逻辑,其中,输入端分别表示图 5 中的 5 个输入。输出端中,“1”表示振荡闭锁开放,“0”表示不开放。

| 输入端:1 2 3 4 5 | 输出端 |
|---------------|-----|
| 0 0 0 0 0     | 0   |
| 0 0 0 0 1     | 1   |
| 0 0 0 1 0     | 0   |
| 0 0 0 1 1     | 0   |
| 0 0 1 0 0     | 1   |
| 0 0 1 0 1     | 1   |
| 0 0 1 1 0     | 1   |
| 0 0 1 1 1     | 1   |
| 0 1 0 0 0     | 1   |
| 0 1 0 0 1     | 1   |
| 0 1 0 1 0     | 1   |
| 0 1 0 1 1     | 1   |
| 0 1 1 0 0     | 1   |

图 9 所有可能的结果输出  
Fig. 9 Output of the possible results

## 5 结语

随着计算机技术的广泛应用以及相关自动化软件的成功研发,保护功能配置、定值整定等传统保护管理工作已经实现了相当高的自动化水平。但是如何实现保护动作逻辑关系等的透明化,却仍停留在一个较低的水准。本文实现的保护动作逻辑动态模型针对保护故障分析、故障回放以及保护调试等应用场合的功能需求,可实现逻辑关系的动态显示和分析,只需在所开发的软件中绘制保护逻辑,即可按照要求进行保护逻辑的动态显示和仿真,便利、直观。

## 参考文献

- [1] ALUR R, HENZINGER T A, HO P H. Automatic symbolic verification of embedded systems. *IEEE Trans on Software Engineering*, 1996, 22(3): 181-201.
- [2] BRANICKY M S, BORKER V S, MITTER S K. A unified

framework for hybrid control: model and optimal control theory. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(1): 31-45.

- [3] BRANCKY M S. Multiple Lyapunov functions and other analysis tools for switched and hybrid systems. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(4): 475-482.
- [4] 蒋昌俊. 离散事件动态系统的 PN 机理论. 北京: 科学出版社, 2000.
- [5] DEMONGODIN I, KOUSSOULAS N T. Differential Petri nets; representing continuous systems in a discrete event world. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1998, 43(4): 573-579.
- [6] KOUTSOUKOS X D, HE K X, LEMMON M D, et al. Timed Petri Nets in hybrid systems: stability and supervisory control. *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, 1998, 8(2): 137-173.
- [7] 邹俊雄, 蔡泽祥, 孔华东, 等. 基于图形平台的电力系统继电保护动作逻辑仿真. *电力系统自动化*, 2002, 26(8): 61-64. ZOU Junxiong, CAI Zexiang, KONG Huadong, et al. The operation logic simulation of relay protection of power systems based on graphic platform. *Automation of Electric Power Systems*, 2002, 26(8): 61-64.
- [8] 杨胜春, 王力科, 张慎明, 等. DTS 中基于定值判断的继电保护仿真. *电力系统自动化*, 1998, 22(8): 30-32. YANG Shengchun, WANG Like, ZHANG Shenming, et al. Simulation of relay protection based on quantitative comparison in DTS. *Automation of Electric Power Systems*, 1998, 22(8): 30-32.
- [9] 王为国, 代伟, 万磊, 等. DTS 中继电保护和自动装置仿真方法的分析. *电力系统自动化*, 2003, 27(5): 58-60. WANG Weiguo, DAI Wei, WAN Lei, et al. Study on the simulation methods of protection relay and security automatic equipment in dispatcher training simulator. *Automation of Electric Power Systems*, 2003, 27(5): 58-60.
- [10] 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. *中国电机工程学报*, 2003, 23(1): 20-25. ZHAO Hongshan, MI Zengqiang, NIU Dongxiao, et al. Power system modelling using hybrid system theory. *Proceedings of the CSEE*, 2003, 23(1): 20-25.

戴志辉(1980—),男,通信作者,博士研究生,讲师,主要研究方向:电力系统保护与控制。E-mail: daihuadian@163.com

王增平(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统保护与控制研究。

## Modeling and Dynamic Analysis of Microcomputer-based Protection Operation Logic

DAI Zhihui, WANG Zengping

(North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** In view of the situation where the drawing of a protective logic diagram has only the displaying function but no transparent analysis of the logic actuation needed by microprocessor protection, a new logic quasi-hybrid protective relaying operation model based on the programmable time Petri net (PTPN) is developed. The relaying component base and logic analytic modules based on the PTPN and vector diagram pixels are extended. A graphic protective logic analytic platform is developed that is suitable for application in protective relaying playback and relaying program debugging, thus meeting the requirement for dynamic display and protective relaying program debugging. The correctness and reliability of the model proposed is verified with an example.

**Key words:** hybrid model; protection operation logic; dynamical analysis; PTPN