

# 集成冗杂保护信息的扩展 Petri网故障诊断

徐青山<sup>1</sup>, Tobias Mirbach<sup>2</sup>, 唐国庆<sup>1</sup>

(1. 东南大学电气工程系, 江苏 南京 210096; 2 亚琛工业大学, 德国 亚琛 52064)

**摘要:** 提出用扩展 Petri网后向诊断模型来处理具有冗杂保护信息的电力系统故障, 其有效性在宿豫县黄墩变故障诊断中得到了印证, 同时也与前向 Petri网演绎仿真所得的结果相吻合。不确定或不正确的保护信息也可以通过与所建立起的相应诊断模板进行比照分析给出定性的结论。全部诊断过程只需要建立正确的 Petri网模型和进行一些简单的矩阵运算就可以获得准确的结果, 节省了故障诊断时间, 提高了效率, 适于实时在线故障诊断。

**关键词:** 电力系统; Petri网; 故障诊断; 继电保护

**中图分类号:** TM732 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2005)10-0045-04

## 0 引言

迄今为止, 国内外在电网故障诊断方面已经提出了多种故障诊断方法, 包括基于专家系统的方法<sup>[1]</sup>、基于人工神经网络与专家系统相结合的方法<sup>[2]</sup>、基于模糊理论与专家系统相结合的方法<sup>[3]</sup>等等。这些方法不是需要复杂的计算就是需要大量的启发式规则。Petri网能够解释系统的结构和动态行为的重要信息, 图形化地表达系统的模型, 非常适合于离散事件动态系统的建模和分析。由于故障的产生和传播是一个典型的动态行为过程, 基于Petri网的故障诊断方法可将知识表示和诊断推理融为一体, 完成描述性知识和过程性的诊断推理。电网故障诊断除了考虑现有 SCADA 遥信、遥测等信息外, 如何将众多主保护、主后备保护以及二级后备保护动作信息纳入综合分析对于是否能形成正确有效的诊断结论是非常重要的, 有鉴于此, 本文提出了一种扩展 Petri网后向诊断方法。

## 1 Petri网理论<sup>[4]</sup>

Petri网的概念最初是 1962年由 Carl Adam Petri博士在其论文中首先提出。它实际上是一个有向图, 其基本原理是通过 3个基本的结构元素: 库所(place)、变迁(transition)和弧(arc), 来描述一个系统之间各元素的有机关系。库所集用于描述可能的系统局部状态, 变迁用于描述修改系统状态的事件, 弧是局部状态和事件之间的关系。在 Petri网模型中, 标记(token)包含在库所中, 他们在库所中的状态变化表示系统的不同状态。如果一个库所描述一个条件, 当一个标记表现在这个位置中, 条件为真,

否则为假。如果一个变迁的所有输入库所(这些库所连接到这个变迁, 弧的方向从库所到变迁)至少包含一个标记, 那么这个变迁可能实施(相联系的事件可能发生)。

定义 1: 一个三元组  $N = (S, T, F)$  是一个 Petri网, 当且仅当

- 1)  $S \cap T = \emptyset$  (网非空)。
- 2)  $S \cup T = \Phi$  (二元性)。
- 3)  $F \subseteq (S \times T) \cup (T \times S)$  (流关系仅存在  $S$  与  $T$  元素之间)。
- 4)  $\text{dom}(F) \cap \text{cod}(F) = \emptyset$  (没有孤立元素)。

在图形上,  $S$ 元素(库所)用一个圆圈来表示,  $T$ 元素(变迁)用一段竖黑线来表示,  $S$ 与 $T$ 之间的流关系用带箭头的弧表示。上述式中  $\text{dom}(F)$ 以及  $\text{cod}(F)$ 分别是指流  $F$ 的定义域和值域。

定义 2: 对于任何给定的 Petri网, 它的拓扑结构可用一个矩阵来表示。这个矩阵被称为关联矩阵, 它有  $s$ 行,  $t$ 列, 定义为:

$$C(s, t) = \begin{cases} -W(s, t), & \text{iff}(s, t) \in F \\ +W(s, t), & \text{iff}(t, s) \in F \\ 0 & \end{cases} \quad (1)$$

其中:  $W(s, t)$ 是从  $s$ 到  $t$ 的弧的权值, 称为弧权函数;  $(s, t) \in F$ 意味着存在一个从  $s$ 到  $t$ 的流关系。

## 2 在故障诊断中的应用<sup>[5]</sup>

### 2.1 前向 Petri网

故障平息的过程常用前向 Petri网模型来推演。以图 1所示节点保护模型为例, 库所  $N$ 中的标记为 1则意味着母线  $N$ 上有故障发生, 继电器  $R_1, R_2$ 中的标记为 1说明其感测到了故障电流, 一旦标记转

移到断路器库所  $CB_1$  和  $CB_2$  中,则意味着断路器已经动作切除故障。

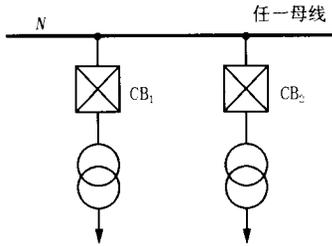


图 1 简单的节点保护模型

Fig 1 Simple protection model of nodes

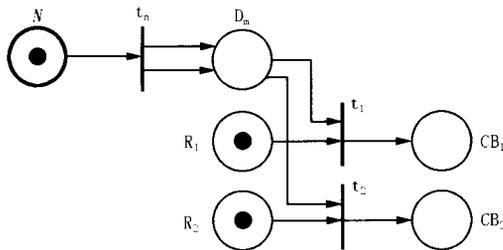


图 2 节点 N 的 Petri网模型

Fig 2 Petri model of node N

### 2.2 后向 Petri网

故障诊断的过程是故障清除过程的逆过程,为此我们把弧的箭头指针反向就可以得到故障诊断的模型(如图 3)。

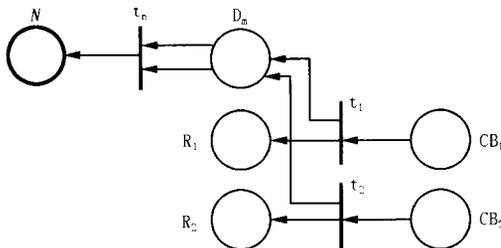


图 3 节点 N 的故障诊断模型

Fig 3 Fault diagnosis model of node N

假设从微机继电保护系统接收到如下故障信息:  $CB_1 = 11, CB_2 = 11, t_1 = 0.5 s, t_2 = 0.6 s$ ,在这里 11 代表装置动作。

则可由诊断矩阵

$$M_1 = M_0 + CU \quad (2)$$

判明故障,这里  $M_1$  为库所集最终标记,  $M_0$  为库所集初始标记,  $C$  为  $i$  列  $s$  行 Petri网关联矩阵,由于变迁 1 和 2 都具有动作时间,所以变迁初始标记矩阵  $U = [1 \ 1 \ 1]^T$ 。

即

$$M_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -2 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \begin{matrix} N_1 \\ D_m \\ R_1 \\ CB_1 \\ R_2 \\ CB_2 \end{matrix} \quad (3)$$

分析诊断结果,库所  $N$ ,继电器  $R_1, R_2$  中最终标记都为真,依据节点标记为真且其所关联的所有继电器都发生了动作,则可以确认母线节点  $N$  发生了故障。

### 3 扩展 Petri网<sup>[6]</sup>

前面所述的 Petri网故障分析方法,存在一个致命的缺陷,因为其默认了一个假设前提:任何故障的平息都是一系列主保护在动作。在实际电力系统中,情况完全不是这样,主保护可能动作失败,必须也需要后备保护动作来消除故障。

#### 3.1 扩展定义

定义 1:主保护与从保护之间的动作关系通过添加有向变迁弧表示。

定义 2:前向 Petri分析网显式体现主从保护间动作关系,后向诊断 Petri网为避免无意义结论,忽略这种主从关系。

#### 3.2 应用实例

以宿豫县黄墩变为例(部分电气主接线如图 4),双母接线,有 4 条联络线以及两条负荷出线  $N_1$  和  $N_2$ 。出线  $N_1$  设有主保护(断路器  $CB_1$  动作),主后备保护(断路器  $CB_2$  以及  $CB_3$  动作)以及二级后备保护(断路器  $CB_4, CB_5, CB_6$  以及  $CB_7$  动作)。其前向 Petri网分析模型如图 5 所示。

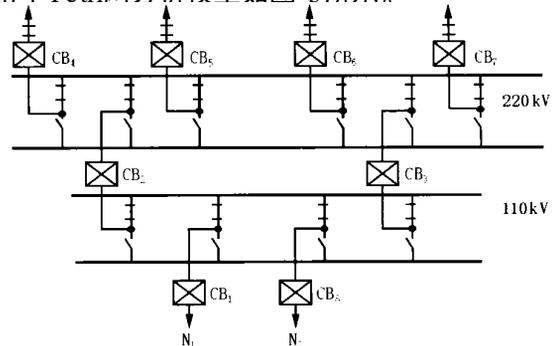


图 4 宿豫县黄墩变部分电气接线

Fig 4 Electrical connection of Huangdun substation of Suyu

考虑  $CB_4, CB_5$  作为远后备保护,动作时间滞后于  $CB_2$ ;  $CB_2$  作为主后备保护,动作时间滞后于  $CB_1$ 。同样地,  $CB_3, CB_6$  以及  $CB_7$  做类似处理。这时,当出线  $N_1$  发生故障时,继电器  $R_1 \sim R_7$  中都探测到故障电流,库所  $N_1$  中标记变迁到  $R_1 \sim R_7$ ,变迁  $t_1 \sim t_7$  都被激活。但由于主保护动作时限最短,断路器  $CB_1$  能够最先动作。假使故障因此排除后,继电器  $R_2 \sim R_7$  应能恢复到先前的状态,即库所  $R_2 \sim R_7$  中的标记应自动消失。假使主保护动作失败,计及动作时延,处于激活状态的  $CB_2, CB_3$  将动作,消除其它库所中的标记;依次类推。这就解释了 Petri网中主保护与主后备保护、主后备保护与二级后备保护之间存在变迁弧的原因。

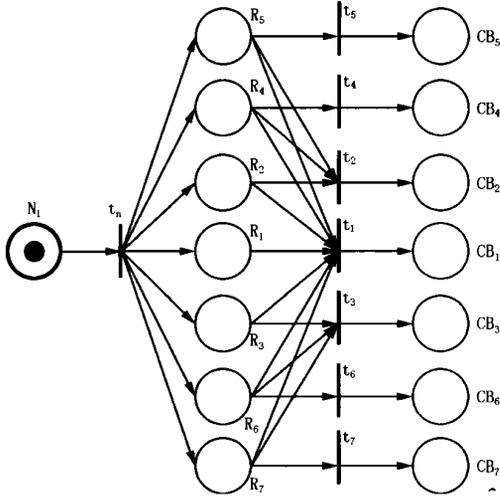


图 5 带多重保护的前向 Petri网分析模型

Fig 5 Forward Petri model of multi-protections

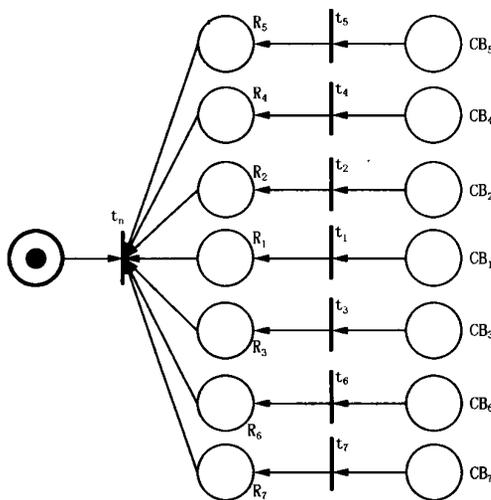


图 6 带多重保护的向后 Petri网故障诊断模型

Fig 6 Backward Petri model of multi-protections

### 3.2.1 故障诊断<sup>[7]</sup>

后向故障诊断模型相对于前向分析模型作了两点修改:首先,所有变迁的弧反向;其次,去除那些关联后备保护的有向变迁弧(如图 6),这是为了避免故障诊断(主保护动作)时所有继电器无意义的同一外特征。

仍以黄墩变为例,现有采集信息如下:  $CB_3 = 11, R_1 = R_2 = R_3 = 11, t_1 = 0.1s, t_2 = t_3 = 0.3s$  则前向 Petri关联矩阵  $C_f$  以及后向 Petri关联矩阵  $C_b$  分别如下:

$$C_f = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} N_1 \\ R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ R_4 \\ R_5 \\ R_6 \\ R_7 \\ CB_1 \\ CB_2 \\ CB_3 \\ CB_4 \\ CB_5 \\ CB_6 \\ CB_7 \end{matrix} \quad (4)$$

$$C_b = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

进行后向 Petri网故障诊断,初始库所特征向量为:

$$M_{b0} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T \quad (5)$$

变迁特征向量为  $U_b = [1 \ 1 \ 1 \ 1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ ,依据

$M_{b1} = M_{b0} + C_b U_b$  即可得

$$M_{b1} = [1\ 0\ 0\ 0\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T \quad (6)$$

分析最终库所特征向量可知:继电器  $R_4 \sim R_7$ , 断路器  $CB_1, CB_2$  中标记均为 -1, 说明没有任何动作;继电器  $R_1 \sim R_3$ , 断路器  $CB_3$  中标记为 0, 说明动作成功(库所标记已转移), 又因为出线库所  $N_1$  中标记为 1, 综合可得如下结论:出线  $N_1$  出线故障, 断路器  $CB_1, CB_2$  动作失败, 断路器  $CB_3$  动作成功。

### 3.2.2 后续论证

1) 前向 Petri网演变分析:  $M_{i0}$  意味着故障初始状态, 即出  $N_1$  线刚刚发生故障, 则  $M_{i0} = [1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0]^T$ , 变迁状态向量  $U_f$  与后向诊断网络相同, 则由  $M_{i1} = M_{i0} + C_f U_f$  可得

$$M_{i1} = [0\ 0\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ -1\ 1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 0]^T$$

断路器  $CB_1 \sim CB_3$  都有动作, 继电器  $R_1$  中标记为 0(动作), 其它继电器标记为 -1(没有动作), 由于主保护动作最迅速的缘故, 断路器  $CB_1$  最先动作平息故障, 动作一旦失败, 主后备保护断路器  $CB_2, CB_3$  动作切除故障。对照上例采集信息可以判断, 断路器  $CB_3$  正确动作, 断路器  $CB_1, CB_2$  动作失败, 与上面所述的结论一致。

2) 宿豫供电公司现场证实出线  $N_1$  (刘口线 181) 由于连日阴雨发生单相接地故障, 断路器  $CB_1, CB_2$  动作失败, 与分析结果吻合。

表 1 故障诊断模板

Tab 1 Fault diagnosis module

继电器			断路器		
后向结果	采集信息	结论	前向结果	采集信息	结论
0	1	动作成功	1	1	动作成功
0	0	动作失败	1	0	动作失败
-1	1	误动作	0	1	误动作
-1	0	没有动作	0	0	没有动作

## 4 结论

本文提出用扩展 Petri网后向诊断网络来处理具有冗杂保护信息的电力系统故障, 并通过前向 Petri网演绎证实了其有效性。可以建立相应的诊断模板(参见表 1)比照所采集到的信息给出定性的结论。整个诊断过程只需要建立正确的 Petri网模

型和进行一些简单的矩阵运算就可以获得准确的结果, 节省了故障诊断的时间, 提高了效率, 尤其适合实时在线诊断。

### 参考文献:

- [1] Ernesto V M, Oscar L, Chacon M. An On-line Expert System for Fault Section Diagnosis in Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 357-362
- [2] Gu X P, Yang Y H, Zhang W Q. Integration of Artificial Neural Networks and Expert Systems for Power System Fault Diagnosis [A]. Proceedings of IPEC 95. Singapore: 1995.
- [3] Cho H J, Park J K. An Expert System for Fault Section Diagnosis of Power Systems Using Fuzzy Relations [J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 243-248
- [4] Petri C A. 佩特里网 [M]. 袁崇义, 译. 南京: 东南大学出版社, 1989.  
Petri C A. Petri Nets [M]. YUAN Chong-yi, Trans Nanjing: Southeast University Press, 1989.
- [5] Lo K L, Ng H S, Trecat J. Power Systems Fault Diagnosis Using Petri Nets [J]. IEE Proceedings—Gener, Transm and Distrib, 1997, 144(3): 231-236
- [6] Lo K L, Ng H S, Grant D M, et al. Extended Petri Net Models for Fault Diagnosis for Substation Automation [J]. IEE Proceedings—Gener, Transm and Distrib, 1999, 146(3): 229-234.
- [7] 赵洪山, 米增强, 杨奇逊. 基于冗余嵌入 Petri网技术的变电站故障诊断 [J]. 电力系统自动化, 2002, 26(2): 32-35.  
ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, YANG Qi-xun. Substation Fault Diagnosis Based on Petri Nets Embedding [J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(2): 32-35.

收稿日期: 2004-09-13; 修回日期: 2004-11-03

作者简介:

徐青山(1979-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行控制与故障诊断; E-mail: xu\_qingshan@sohu.com

Tobias Mirbach(1978-), 男, 德国人, 学士, 主要研究方向为电力系统故障诊断;

唐国庆(1937-), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事人工智能、电力电子在电力系统中的应用方面的研究。

## Fault diagnosis based on extended Petri nets upon the integrated protection information

XU Qing-shan<sup>1</sup>, Tobias Mirbach<sup>2</sup>, TANG Guo-qing<sup>1</sup>

(下转第 61 页 continued on page 61)

断、定时器 T1 下溢中断、CAN 通讯中断和定时器 T2 周期中断、分别完成过零标志置位、周期控制、与上位机通信和 A/D 启动。

### 3 结论

数字信号处理器芯片 TMS320LF2407A 有很强的数字处理、分析和计算能力。本文设计的新型低压静止无功发生器控制器充分利用了 TMS320LF2407A 的特点,加快了处理速度和精度,能实现各种复杂的算法,并且结合自身高精度的 ADC 模块,使采集回来的数据精度高,实时性好。因此,用 DSP 芯片 TMS320LF2407A 作为主处理器的控制器能更好地满足实时性和精确性的要求。同时,采用 TMS320LF2407A 作为控制芯片,可以减少电路的复杂程度、提高功率密度、降低成本,并且减少因元器件的离散性给调试和批量生产所带来的困难。

### 参考文献:

[1] TMS320LF/LC240Xa DSP Controllers System and Peripherals[Z]. Texas Instruments, 2001.

- [2] 王兆安,杨君,刘进军. 谐波抑制和无功功率补偿[M]. 北京:机械工业出版社,1999.  
WANG Zhao-an, YANG Jun, LIU Jin-jun Harmonics Suppression and Reactive Power Compensation[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [3] 刘和平,王维俊,江渝. TMS320LF240x DSP C语言开发应用[M]. 北京:航空航天大学出版社,2003.  
LIU He-ping, WANG Wei-jun, JIANG Yu C Language Application Based on Digital Signal Processing TMS320LF240x[M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press, 2003.
- [4] AT45DB021B-2 7 Volt Only DataFlash[Z]. A mel Corporation, 1997.
- [5] PCF8583-Clock/Calendar with 240 ×8-bit RAM [Z]. Philips Semiconductors Corporation, 1997.

收稿日期: 2004-08-27; 修回日期: 2004-11-08

### 作者简介:

李海鹏(1981-),男,硕士研究生,从事电力电子技术和智能控制的研究;E-mail: lhp32@sohu.com

牛培峰(1958-),男,博士,教授,从事电力电子技术、电力系统自动化和智能控制的研究。

## Design of a static VAR generator controller based on digital signal processor

LI Hai-peng, NIU Pei-feng

(Ocean University of China, Qingdao 266071, China)

**Abstract:** The accurate measurement of power system factors is the basis of accurate power factor compensation. However, traditional microcontroller Unit(MCU) can not complete the requirements of accuracy and real-time in power system. Therefore, the paper introduces a new static VAR generator(SVG) controller, which adopts TMS320LF2407A as main processor. It can compute and measure more quickly and accurately than traditional MCU. Meanwhile, the paper designs and realizes comparatively integrated microcomputer controlled circuit with its peripherals circuit, including sampling circuit, protecting circuit and communicating circuit. In addition, the paper gives the scheme of controlling software structure flow chart.

This project is supported by National Tenth-five Year Technologies R&D Programme of Qingdao (No. 02-1-kj-gg-14).

**Key words:** reactive power compensation; SVG; DSP; MCU

(上接第 48 页 continued from page 48)

(1 Dept of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2 Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule Aachen, RWTH-Aachen 52064, Germany)

**Abstract:** A fault diagnosis method based on extended backward Petri nets is presented, which is mainly to deal with some faults comprising integrated protection information in power system. It has been proved to be true in fault diagnosis of Huangdun substation of Suyu county, and the results are in accordance with the ones deduced by forward Petri model. Some uncertain or incorrect information can be testified by comparison with corresponding diagnosis template. All diagnosis course can be completed with correct Petri model and some simple matrix numeration. This method saves time for diagnosis greatly and enhances efficiency, so it is very applicable for real-time fault diagnosis.

**Key words:** power system; Petri nets; fault diagnosis; relay protection