

基于有色 Petri 网的电力系统故障诊断模型研究

曾庆锋, 何正友, 杨健维

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 现有的基于 Petri 网的电网故障诊断模型通用性不强, 针对大电网建模时模型结构较复杂。建立了一种基于有色 Petri 网的电网故障诊断模型, 用不同的单色代表保护类型、断路器和电网元件, 根据保护原理和网络拓扑组合成复合色, 用带有这些颜色标记的托肯表示不同类型的状态信息。同时建立有色 Petri 推理过程, 给出变迁的点火规则, 根据有色 Petri 网的推理规则进行推理获得诊断结果。通过对 110 kV 局部电网和某省局部电网的仿真验证表明: 该方法对简单和复杂故障均能获得正确的诊断结果, 并且推理速度快, 模型简便, 网络拓扑和保护配置的改变不影响模型结构, 是一种通用性较强的电网故障诊断方法。

关键词: 有色 Petri 网; 故障诊断模型; 电网故障; 通用性

Fault diagnosis model of electric power systems based on coloured Petri net

ZENG Qing-feng, HE Zheng-you, YANG Jian-wei

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Complex models and lack of generality exist in fault section estimation methods based on Petri nets at present research. So a new model and its reasoning rules are built for fault diagnosis based on Coloured Petri Net (CPN). The CPN model, uses different colors to represent protective relays, circuit breakers and elements, and uses these colors to compose composite colours under principles of protective relays and network topology. Tokens of these colors represent different types of information. The reasoning model and rules are set up at the same time. Then the diagnosis result may get from the CPN model by giving fault data. From simulations on 110 kV power system and a real power system, correct results can be gotten by both simple and complex faults, with quickly reasoning speed. Also the model is simple and convenient, and the network topology and protection of the configuration change does not affect the model structure. So the CPN method is a generality fault diagnosis method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50877068).

Key words: coloured Petri net; fault section estimation model; power system fault; generality

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)14-0005-07

0 引言

随着现代电力系统互联规模的扩大和自动化水平的提高, 当电网发生故障时, 如不能及时准确地定位故障区域, 处理故障设备, 恢复供电, 很可能引发大面积停电事故并造成重大经济损失。电网故障发生时, 装设在电力系统中的自动化装置会产生大量的报警信息, 使得运行人员难以快速准确判断故障区域。因此, 及时准确地诊断电力系统故障对于保证电网安全稳定运行具有十分重要的意义。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50877068); 教育部优秀新世纪人才支持计划项目 (NCET-06-0799)

Petri 网因其具有良好的并行计算和矩阵运算的能力以及便捷的图形化的表示方法, 已经被国内外研究人员应用于电网故障诊断领域。文献[1]分类阐述了现有的电网故障诊断方法。文献[2]综合介绍了 Petri 网在电力系统领域内的应用包括故障诊断、故障恢复、网络拓扑分析等。文献[3-4]采用反向推理建立了基于 Petri 网的模型, 文献[4]的模型具有一定的通用性和容错性, 但仅建立了母线和线路模型; 文献[5-9]采用保护断路器关联的方式分别建立了 Petri 网或模糊 Petri 网的模型, 存在对大电网建模时模型较大且复杂的问题; 文献[10]用编码方式建立了故障诊断的 Petri 网模型和算法, 并与其他电网故障诊断方法进行了比较; 文献[11]利用保护动

作的时序，建立了保护断路器关联的分布诊断的 Petri 网模型，考虑了实际保护类型，缺乏容错能力。

基于现有方法的不足，本文将高级 Petri 应用于电网故障诊断中，尝试简化模型，解决已有模型对大电网建模时结构复杂，对不同电网通用性不强的问题。

有色 Petri 网作为高级 Petri 网的一种^[12]，利用颜色这一特殊的工具来表示相同功能或类型的资源，可以对模型进行简化^[13]，即用一个模型代替多个功能相同或近似的模型，这一简化增强了模型的通用性。文献[14]使用 CPN tools 仿真工具对以变电所为基础的输配电线路进行了有色 Petri 网的建模仿真，验证了该方法的有效性。文献[15]将其应用于配电网的故障复电中，取得良好的效果。

基于此，本文研究了一种基于有色 Petri 网的电网故障诊断方法。首先建立了电网故障诊断的有色 Petri 网模型，并探讨了适合该模型的点火规则，然后讨论了运用该模型对不同拓扑不同保护配置的电网的建模和推理计算，最后进行仿真验证。通过分析表明：该模型对简单和复杂故障均能获得正确的诊断结果，并且推理速度快，不受网络拓扑和保护配置的影响，是一种通用性较强的电网故障诊断方法。

1 基于 CPN 的电网故障诊断模型的建立

1.1 有色 Petri 网定义

定义 1 有色 Petri 网 (Coloured Petri Net, CPN) 是一个七元组，它的定义为^[16]

$$\Sigma = (P, T; F, C, I_-, I_+, M_0) \quad (1)$$

式中： $(P, T; F)$ 为有向网，称为 Σ 的基网； $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为库所的有限集合，库所的作用是存放资源 (Petri 网中称为托肯)； $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 为变迁的有限集合，变迁的作用是发生事件利用托肯产生新的托肯，在 Petri 网中发生事件称为点火； $F \subseteq P \times T \cup T \times P$ (“ \times ”为笛卡儿积) 表示托肯移动的流关系，在图形中表示为弧； $C: P \cup T \rightarrow \Gamma(D)$ ， $\Gamma(D)$ 为颜色集 D 的幂集合，对于 $p \in P$ ， $C(p)$ 称为托肯色是库所 p 上可存放的托肯的所有颜色的集合。对于 $t \in T$ ， $C(t)$ 称为出现色是所有可以使变迁 t 点火的颜色的集合。这些颜色可以是单色，也可以是几种单色组合成的复合色。

I_- 和 I_+ 分别是 $P \times T$ 上的负函数和正函数，使得对所有 $(p, t) \in P \times T$ 有 $I_-(p, t) \in [C(t)_{MS} \rightarrow C(p)_{MS}]_{\mathbb{L}}$ 且 $I_-(p, t) = 0$ 的充分必要条件是 $(p, t) \notin F$ ， $I_+(p, t) \in [C(t)_{MS} \rightarrow C(p)_{MS}]_{\mathbb{L}}$ 且 $I_+(p, t) = 0$ 的充分必要

条件是 $(t, p) \notin F$ ； $M_0: P \rightarrow D_{MS}$ ，称为 Σ 的初始标识，满足条件 $\forall p \in P: M_0(p) \in C(p)_{MS}$ 。

简单的有色 Petri 网图形表示如图 1 所示。

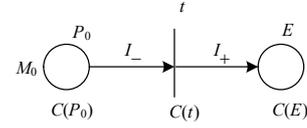


图 1 有色 Petri 网系统

Fig.1 Coloured Petri net

此外，还有以下定义。

定义 2 (步的定义)^[12,16]

$X: T \rightarrow D_{MS}$ 为 Σ 的标识 $M(p)$ 下的一步的条件是： $\forall t \in T: X(t) \in C(t)_{MS}$ 且 $\forall p \in P: \sum_{t \in T} I_-(p, t)(X(t)) \leq$

$M(p)$ ，其中 $M(p) \in C(p)_{MS}$ 为有色 Petri 网的标识。 $X(t)$ 表示变迁 t 一次点火中各种颜色托肯并发的次数。

定义 3 (托肯传递规则)^[12,16]

设 X 为有色 Petri 网系统 Σ 在初始标识 M_0 下的一步，则 X 发生后的后继标识 M 由下式给出：

$$\forall p \in P, \quad M(p) = M_0(p) + X_+(t) \sum_{t \in T} I_+(p, t) - X_-(t) \sum_{t \in T} I_-(p, t) \quad (2)$$

其中“+”和“-”均是多重集间的运算。如果模型中的初始库所 P_0 或结论库所 E ，缺少输入或输出变迁连接，又或只有输入或输出变迁点火；那么公式 (2) 可变为：

$$M(p_0) = M_0(p_0) - X(t) \sum_{t \in T} I_-(p_0, t) \quad (3)$$

$$M(E) = M_0(E) + X(t) \sum_{t \in T} I_+(E, t) \quad (4)$$

如果库所只有输入方向变迁点火也适用式 (4)，只有输出方向变迁点火也适用式 (3)。

1.2 基于 CPN 的电网故障诊断模型

电网发生故障时，SCADA 系统、故障录波器等电子设备会记录故障发生时的各种电压电流以及保护断路器动作信息，并把这些信息传送到控制中心。考虑到诊断准确率和诊断速度的平衡，本文只利用保护和断路器信息。

电网故障诊断 CPN 模型中用单色表示断路器、电网元件和保护类型。不同单色或复合色的托肯表示保护动作、断路器跳闸、元件故障等状态信息，其中保护类型的颜色称为保护色，断路器的颜色称为断路器色，电网元件的颜色称为元件色，具体的保护的色称为保护复合色，期望跳闸的断路器的颜色称为期望断路器色，断路器的位置状态的颜色称为断路器位置复合色。

保护在配置时设定了保护元件和应动作断路器, 因此保护复合色表示为<被保护元件的颜色, 保护类型的颜色, <对应断路器的颜色 1、对应断路器的颜色 2、...>>。断路器安装在元件的连接处, 因此两种相关的复合色都由元件色和断路器色组合而成, 具体是, 期望断路器复合色表示为<被保护元件的颜色, 断路器的颜色>, 断路器位置复合色表示为<连接元件的颜色, 断路器的颜色>。

本文将电网故障诊断的 CPN 推理过程分为三层: 信息提取层、信息综合层和判断层。第一层是信息提取层, 输入库所 R 存放接收到的保护动作信息, CB 存放接收到的断路器跳闸信息; 输出库所 $CB1$ 存放接收到的已动作保护期望跳闸的断路器信息, $CB2$ 存放接收到的跳闸断路器的位置信息。变迁 $t11$ 点火表示接收到保护动作信息产生期望跳闸

的断路器信息这一事件; 变迁 $t12$ 点火表示接收到断路器跳闸信息产生该跳闸断路器的位置信息。

第二层是信息综合层, 输入库所分别是第一层的输出库所 $CB1$ 和 $CB2$, 变迁 $t21$ 点火表示综合期望跳闸的断路器信息与实际接收到的跳闸断路器位置信息的异同, 产生元件可能故障的状态信息。输出库所 P 存放元件可能故障信息, 库所中的不同颜色的托肯代表可能处于故障状态的不同元件。

第三层是判断层, 输入库所是第二层的输出库所; 变迁 $t31$ 点火表示代表某一元件可能故障的托肯达到了确定其故障的数量产生最终故障诊断结果; 输出库所 E 存放诊断出的表示元件故障的托肯。

本模型的函数 C, I_-, I_+, M_0 , 可以用表 1 所示的表格给出。

表 1 电网故障诊断有色 petri 网系统
Tab.1 Fault diagnosis system based on CPN

Σ (有色 Petri 网系统)		$t11$	$t12$	$t21$	$t31$	M_0
		保护复合色集合	断路器色集合	期望断路器复合色集合	元件色集合	
R	保护复合色集合	$-ID$				根据实际接收到的数据决定
CB	断路器色集合		$-ID$			
$CB1$	期望断路器复合色集合	$i^* j < p_{r1j}, p_{r3ri} >$		$-ID$		
$CB2$	断路器位置复合色集合		$2 < X, ID >$	$-ID$		
$P1$	元件色集合			p_{r1}	$-nID$	
E	元件色集合				ID	

其中 p_{r1} 表示提取复合色中的第一种颜色, p_{r1j}, p_{r3ri} 分别表示提取复合色第一种、第三种复合色中的第 j, i 种颜色; ID 为恒同映射表示参与的库所托肯色和变迁的出现色一样; X 表示元件色; n 表示数量由具体的电力系统决定。

图 2 是本文建立的电网故障诊断 CPN 模型图形表示。图中 $C1 \sim C5$ 分别对应保护复合色, 断路器色, 期望断路器复合色, 断路器位置复合色, 元件色。

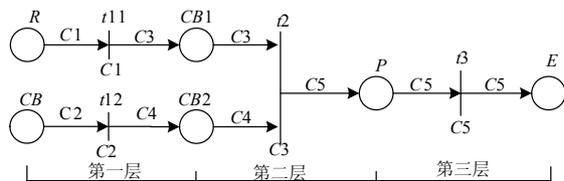


图 2 电网故障诊断有色 petri 网模型
Fig.2 Fault diagnosis CPN model

1.3 CPN 模型的点火规则

本节将讨论上一节模型所需的点火规则, 首先

本模型中每一个变迁的步为 $X(t) = \sum C_q^*$, C_q^* 表示当前变迁点火包含的颜色, 即点火时每一种颜色的托肯只发生一次。

当库所中获得托肯, 由表 1 和定义 1, 可以分别获得各变迁的 I_- 和 I_+ , 当前点火方式下的步, 使得模型的推理可以通过定义 3 进行。对于模型中有两个输入库所的特殊变迁 $t2$ 其点火规则如下。

定义 3 ($t2$ 变迁点火规则)

假设 $CB1$ 中某托肯的颜色为 w , $CB2$ 中某托肯的颜色为 m , w, m 分别代表某一种或多种复合色。如果 $w = m$ 或者 $p_{r2}w = p_{r2}m$, 那么变迁 $t2$ 可以点火。

点火后由表 1 知, $CB1$ 和 $CB2$ 中 w 和 m 色托肯被消耗, 产生新的 $p_{r1}w$ 色托肯传给下一个库所。然而在 $CB1$ 和 $CB2$ 中可能会出现某一方有 n 个托肯和另一方 q 个托肯 ($1 \leq q < n$), 满足任意一个属于 n 的托肯和任意一个属于 q 的托肯符合定义 3。这样, n 个托肯中的任意 q 个将符合定义 3 点火, 使得任意 $n-q$ 个托肯无法点火从而导致冲突。因此

定义如下冲突解决规则，以确定 n 个托肯中哪 q 个可以获得点火机会。

定义 4 (冲突解决规则)

当产生冲突时，首先满足符合 $w = m$ 条件的托肯，再满足符合 $p_{r2}w = p_{r2}m$ 条件的托肯。

并且满足 $w = m$ 时， n 个托肯中的任意 q 个点火发生；满足 $p_{r2}w = p_{r2}m$ 时，如有 n 个 w ， q 个 m ，则先将 w 中各色按托肯数从多到少排列，再依次满足一次，如此循环。

2 基于 CPN 电网故障诊断方法的应用

2.1 模型的建立

为验证本模型及其规则的有效性，先使用一个简单的电网模型进行仿真推理计算。

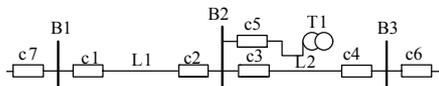


图 3 简单的电网图

Fig.3 A simple power system

图 3 所示电网线路的保护配置为主保护、近后备保护和断路器失灵保护。线路分为送端 s 和受端

r ，连接母线 B2 端为送端。母线只配备主保护，母线主保护或对应断路器失灵的情况下由上一级的保护来切除。变压器只配备主保护和近后备保护，除电源侧外其他侧保护作为本侧相邻设备的后备保护。因此主保护为 $L_{1sm}, L_{1rm}, L_{2sm}, L_{2rm}, B_{1m}, B_{2m}, B_{3m}, T_{1m}$ ，近后备保护为 $L_{1sp}, L_{1rp}, L_{2sp}, L_{2rp}, T_{1p}$ ，远后备保护为 $L_{1ss}, L_{1rs}, L_{2ss}, L_{2rs}, T_{1s}$ ，失灵保护为 $L_{sr1}, L_{sr2}, L_{sr3}, L_{sr4}$ 。

设主保护，近后备保护，远后备保护和失灵保护色为 $\{C_{r1}, C_{r2}, C_{r3}, C_{r4}\}$ ；元件色为 $\{C_{L1}, C_{L2}, C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}, C_{T1}\}$ ；断路器色为 $\{C_{c1}, C_{c2}, C_{c3}, C_{c4}, C_{c5}, C_{c6}, C_{c7}\}$ ；所建立的故障诊断模型如图 4。图中用 X 表示元件色， Y 表示保护类型色， Z 表示断路器色。表 2 列出了图 3 保护配置的保护复合色既所有的 $\langle X, Y, Z \rangle$ 。

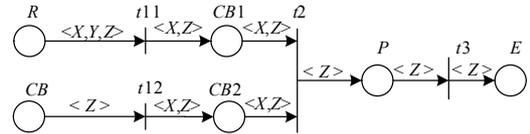


图 4 图 3 所示电网的有色 Petri 的模型

Fig.4 Fault diagnosis CPN model of Fig.3

表 2 图 3 所示电网的保护复合色

Tab.2 Composite colours of protective relays of power system in Fig.3

保护	颜色	保护	颜色
L_{1rm}	$\langle C_{L1}, C_{r1}, C_{c1} \rangle$	L_{1rp}	$\langle C_{L1}, C_{r2}, C_{c1} \rangle$
L_{1sm}	$\langle C_{L1}, C_{r1}, C_{c2} \rangle$	L_{1sp}	$\langle C_{L1}, C_{r2}, C_{c2} \rangle$
L_{2rm}	$\langle C_{L2}, C_{r1}, C_{c4} \rangle$	L_{2rp}	$\langle C_{L2}, C_{r2}, C_{c4} \rangle$
L_{2sm}	$\langle C_{L2}, C_{r1}, C_{c3} \rangle$	L_{2sp}	$\langle C_{L2}, C_{r2}, C_{c3} \rangle$
L_{1ss}	$\langle C_{B1}, C_{r3}, C_{c2} \rangle$	L_{2ss}	$\langle C_{B3}, C_{r3}, C_{c3} \rangle$
L_{1rs}	$\langle C_{B1}, C_{r3}, C_{c1} \rangle$	L_{2rs}	$\langle C_{B2}, C_{r3}, C_{c4} \rangle$
B_{1m}	$\langle C_{B1}, C_{r1}, \langle C_{c1}, C_{c7} \rangle \rangle$	T_{1m}	$\langle C_{T1}, C_{r1}, C_{c5} \rangle$
B_{2m}	$\langle C_{B2}, C_{r1}, \langle C_{c2}, C_{c3}, C_{c5} \rangle \rangle$	T_{1p}	$\langle C_{T1}, C_{r2}, C_{c5} \rangle$
B_{3m}	$\langle C_{B3}, C_{r1}, \langle C_{c4}, C_{c6} \rangle \rangle$	T_{1s}	$\langle C_{B2}, C_{r3}, C_{c5} \rangle$
L_{sr1}	$\langle C_{L1}, C_{r4}, \langle C_{c1}, C_{c7} \rangle \rangle$		$\langle C_{L1}, C_{r4}, \langle C_{c2}, C_{c3}, C_{c5} \rangle \rangle$
L_{sr3}	$\langle C_{L2}, C_{r4}, \langle C_{c2}, C_{c3}, C_{c5} \rangle \rangle$	L_{sr2}	$\langle C_{L2}, C_{r4}, \langle C_{c4}, C_{c6} \rangle \rangle$
		L_{sr4}	$\langle C_{L2}, C_{r4}, \langle C_{c4}, C_{c6} \rangle \rangle$

库所 R 的托肯色和变迁 $t11$ 的出现色为表 2 所列全部复合色：

$$C(R) = C(t1) = \{ \langle C_{L1}, C_{r1}, C_{c1} \rangle, \dots, \langle C_{L2}, C_{r4}, \langle C_{c4}, C_{c6} \rangle \rangle \}$$

库所 CB 的托肯色和变迁 $t12$ 的出现色 $C(CB) = C(t12) = \{ C_{c1}, C_{c2}, C_{c3}, C_{c4}, C_{c5}, C_{c6}, C_{c7} \}$

库所 $CB1$ 的托肯色是期望断路器复合色，库所 $CB2$ 的托肯色是断路器位置复合色，变迁 $t2$ 的出现色为期望断路器复合色和断路器位置复合色的并集。

库所 P 和 E 的托肯色和变迁 $t3$ 的出现色为：

$$C(P) = C(t3) = C(E) = \{ C_{L1}, C_{L2}, C_{B1}, C_{B2}, C_{B3}, C_{T1} \}。$$

$I_-(P, t3) = -2C_i$ 或 $-C_{T1}$ 或 $-3C_{B2}$ 其中 i 表示 $L1, L2, B1, B3$ ； $I_+(P, t3) = C_j$ 其中 j 表示 $L1, L2, B1, B2, B3, T1$ 。步 $X(t)$ 的计算按 1.3 节规则，例如符合变迁 $t3$ 点火的颜色有 $\{ C_{L1}, C_{B2}, C_{T1} \}$ ，则

$$X(t) = \sum C_n^* = C_{L1} + C_{B2} + C_{T1}。$$

2.2 算法验证

对上一节模型应用 1.1 节和 1.3 节推理规则进行

算例验证:

算例 1 保护 L_{1sm} , L_{1rp} 动作, 断路器 c_1 , c_2 跳闸。推理过程的图形表示如图 5, 图中以黑点表示托肯且其具体的颜色在图下说明。初始状态为:

$$M(R) = 1' < C_{L1}, C_{r2}, C_{c1} > + 1' < C_{L1}, C_{r1}, C_{c2} >, \quad M(CB) = 1' C_{c1} + 1' C_{c2}, \quad \text{其他库所无托肯。}$$

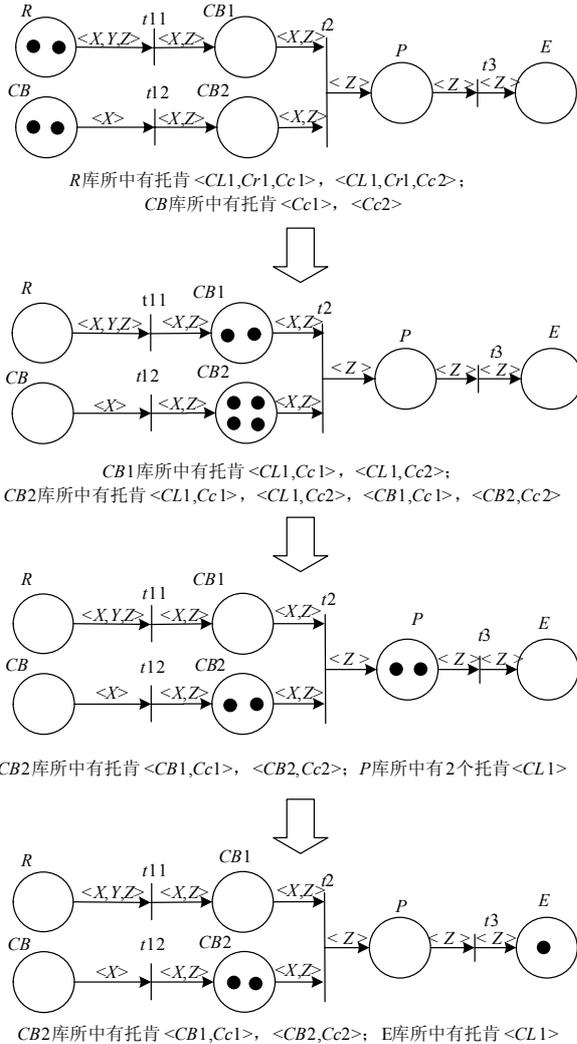


图 5 算例 1 的有色 Petri 网图形表示形式

Fig.5 CPN graph form of reasoning process of case 1

1) 变迁 t_{11} 和 t_{12} 点火, 分别使用式 (3) 或式 (4) 求库所 R , CB , $CB1$, $CB2$ 后继标识得,
 $M(CB1) = 1' < C_{L1}, C_{c1} > + 1' < C_{L1}, C_{c2} >$
 $M(CB2) = 1' < C_{L1}, C_{c1} > + 1' < C_{B1}, C_{c1} > + 1' < C_{L1}, C_{c2} > + 1' < C_{B2}, C_{c2} >$
 库所 R , CB 中托肯被消耗无托肯。

2) $CB1$ 和 $CB2$ 中的托肯符合变迁 t_2 点火条件, 分别用式 (3) 或式 (4) 得 $M(P) = 2' C_{L1}$, $CB1$ 中无托肯, $M(CB2) = 1' < C_{B1}, C_{c1} > + 1' < C_{B2}, C_{c2} >$ 。

3) 变迁 t_3 点火用公式 (3)、(4) 得 $M(E) = 1' C_{L1}$, P 中无托肯, 推理结束。得出线路 $L1$ 故障。推理结束后所有库所中托肯被清除。下文中将不再写出详细推理过程。

算例 2 保护 T_{1m} , L_{2sp} , L_{2rp} , L_{sr4} 动作, 断路器 c_3 , c_5 , c_6 跳闸。

$$M(R) = 1' < C_{L2}, C_{r2}, C_{c3} > + 1' < C_{L2}, C_{r2}, C_{c4} > + 1' < C_{L2}, C_{r4}, C_{c4}, C_{c6} > + 1' < C_{T1}, C_{r1}, C_{c5} >$$

$$M(CB) = 1' C_{c3} + 1' C_{c5} + 1' C_{c6}$$

最后得到推理结果 $M(E) = 1' C_{L2} + 1' C_{T1}$, $L2$ 和 $T1$ 故障。

算例 3 保护 B_{1m} , B_{2m} , L_{2rs} 动作, 断路器 c_1 , c_2 , c_4 , c_5 , c_7 跳闸。

$$M(R) = 1' < C_{B1}, C_{r1}, C_{c1} > + 1' < C_{B1}, C_{r1}, C_{c7} > + 1' < C_{B2}, C_{r1}, C_{c2}, C_{c3}, C_{c5} > + 1' < C_{B2}, C_{r3}, C_{c4} >$$

$$M(CB) = 1' C_{c1} + 1' C_{c2} + 1' C_{c4} + 1' C_{c5} + 1' C_{c7}$$

最后得到推理结果是 $M(E) = 1' C_{B1} + 1' C_{B2}$, $B1$ 和 $B2$ 故障。

通过对图 3 所示的简单电网建立电网故障诊断有色 Petri 网模型, 并设置大量算例进行仿真验证, 证明了本方法的有效性。

3 实例分析

本节选取了一个典型的 110 kV 局部电网图和某省实际的 220 kV 局部电网进行仿真分析, 进一步验证本文建立的方法比以往方法更方便, 模型更简化; 对不同类型、不同拓扑结构的电网具有通用性。

3.1 110 kV 典型电网

图 6 为一个 110 kV 电网接线图^[11], 其中包含了 11 条母线、10 条线路和 20 个断路器, 母线均配备了母线差动保护和断路器失灵保护; 线路均配备有一套反应各种类型故障的纵差速断保护, 对相间短路, 采用阶段式距离保护作为后备保护, 对接地短路, 采用阶段式零序保护作为后备保护。

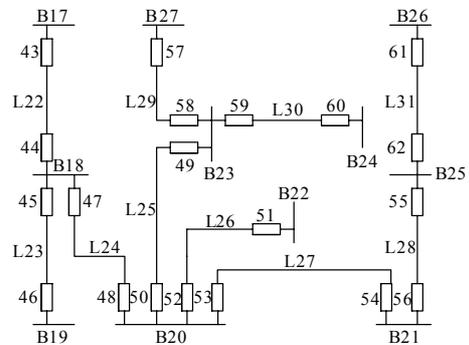


图 6 典型 110 kV 局部电网示意图

Fig.6 A typical 110 kV power system

保护类型颜色同样用 $\{C_{r1}, C_{r2}, C_{r3}, C_{r4}\}$ 表示；元件的颜色用 C_{name} 表示，其中 $name$ 为各元件名；断路器的颜色用 C_{num} 表示， num 为各断路器编号。线路确定故障托肯数为 2，母线的等于其连接的断路器数。

算例 1 动作保护：母差保护 $B18_m$ ，距离保护 II 段 $L23_{pII}$ ，线路纵差保护 $L29_m$ ；跳闸断路器：CB44, CB46, CB47, CB57, CB58。

$$M(R) = 1' < C_{B18}, C_{r1}, < C_{44}, C_{45}, C_{47} >> + \\ 1' < C_{B18}, C_{r3}, C_{46} > + 1' < C_{L29}, C_{r1}, < C_{57}, C_{58} >> \\ M(CB) = 1' C_{44} + 1' C_{46} + 1' C_{47} + 1' C_{57} + 1' C_{58}$$

最终 $M(E) = 1' C_{B18} + 1' C_{L29}$ ，得出 B18 和 L29 故障。

算例 2 动作保护：零序 I 段 $L28_{spI}$ ，零序 II 段 $L28_{pII}$ ， $L31_{ssII}$ ；跳闸断路器：CB56, CB55, CB61。

$$M(R) = 1' < C_{L28}, C_{r2}, C_{55} > + 1' < C_{L28}, C_{r2}, C_{56} > + \\ 1' < < C_{L28}, C_{B25} >, C_{r3}, C_{61} > \\ M(CB) = 1' C_{55} + 1' C_{56} + 1' C_{61}$$

最终 $M(E) = 1' C_{L28}$ ，得出 L28 故障。

以上算例结果与文献[11]中结果一致。本模型与文献[11]中的算例模型库所、变迁、计算量等数据的对比如表 3。文献[11]中为矩阵运算，计算次数等于矩阵乘法的次数和矩阵加法的次数的和，其中矩阵乘法的次数按行数与列数的乘积计算，矩阵加法的次数按矩阵维数计算。

表 3 本模型和文献[11]模型的数据对比

Tab.3 Data of CPN model compared with the data of Ref.11

	model			
	本模型		文献[11]模型	
	算例 1	算例 2	算例 1	算例 2
库所数	6	6	50	35
变迁数	4	4	29	20
有向弧数	9	9	79	53
计算次数	52	33	296	176

如表 3 所示，本文的模型库所、变迁和有向弧数远低于文献[11]中模型，尽管文献[11]中部分模型可以通用，但其名称不同，代表意义不同，须分开计算，工作量超过本文的模型。因此本文的模型在建模和计算上比文献[11]的更简便。

3.2 220 kV 典型电网

图 7 为某省 220 kV 局部电网图^[18]，包含 6 条母线，9 条连接线路，22 个断路器，2 个变压器单元。线路 L3、L7、L8 配备双重化高频保护、距离保护、零序保护、失灵保护等，线路 L5、L6 和 L9 配备相间和接地距离保护、高频保护、电流速断保

护和断路器失灵保护等。

保护的顏色、断路器的顏色和元件的顏色与 3.1 节的定义一致。

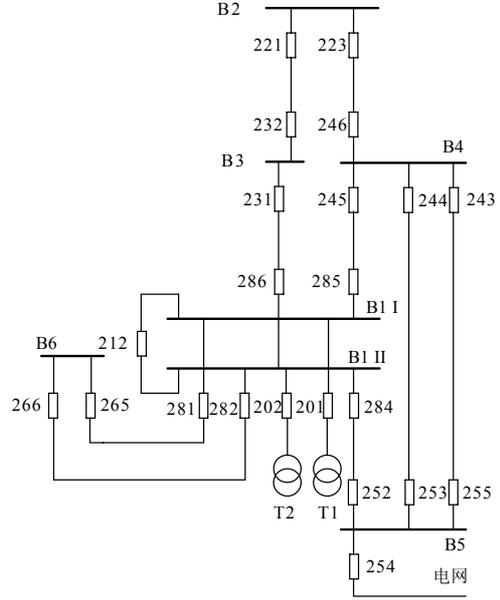


图 7 某省 220 kV 局部电网示意图

Fig.7 220 kV power system

假设线路 L1, L2 和 L4 的保护配置和 L3 一样。通过多个假设的算例仿真，均能得到正确的结果，下面给出文献[18]中分析的实际案例的点火推理过程。

本算例中跳闸断路器有 212, 284, 282, 286, 202, 252, 243, 244, 231；动作保护有线路 L3 高频零序保护、线路 L9 的失灵保护、距离保护 Z_{II} 段和 I_{04} 段、线路 L9 的 B5 端距离保护 Z_I 段，线路 L5、L6 的 B4 端距离保护 Z_I 段。

$$M(CB) = 1' C_{202} + 1' C_{212} + 1' C_{243} + 1' C_{244} + \\ 1' C_{252} + 1' C_{282} + 1' C_{284} + 1' C_{286} + 1' C_{231}$$

$$M(R) = 1' < C_{L3}, C_{r1}, C_{231} > + 1' < C_{L9}, C_{r1}, C_{284} > + \\ 1' < C_{L9}, C_{r2}, C_{284} > + 1' < C_{L9}, C_{r1}, C_{252} > + \\ 1' < C_{L6}, C_{r1}, C_{243} > + 1' < C_{L5}, C_{r1}, C_{244} > + \\ 1' < C_{L9}, C_{r4}, < C_{284}, C_{286}, C_{282}, C_{202}, C_{212} >>$$

第一层点火得

$$M(CB1) = 1' < C_{L3}, C_{231} > + 3' < C_{L9}, C_{284} > + 1' < C_{L9}, C_{252} > + \\ 1' < C_{L6}, C_{243} > + 1' < C_{L5}, C_{244} > + 1' < C_{L9}, C_{286} > + \\ 1' < C_{L9}, C_{282} > + 1' < C_{L9}, C_{202} > + 1' < C_{L9}, C_{212} >$$

$$M(CB2) = 1' < C_{T2}, C_{202} > + 1' < C_{B4}, C_{243} > + 1' < C_{L6}, C_{243} > + \\ 1' < C_{B1I}, C_{212} > + 1' < C_{B1II}, C_{202} > + 1' < C_{B1II}, C_{212} > + \\ 1' < C_{L5}, C_{244} > + 1' < C_{B4}, C_{244} > + 1' < C_{B5}, C_{252} > + \\ 1' < C_{L9}, C_{252} > + 1' < C_{B1II}, C_{282} > + 1' < C_{L8}, C_{282} > + \\ 1' < C_{L9}, C_{284} > + 1' < C_{L3}, C_{286} > + 1' < C_{B1II}, C_{286} > + \\ 1' < C_{B3}, C_{231} > + 1' < C_{L3}, C_{231} > + 1' < C_{B1II}, C_{284} >$$

第二层点火得

$$M(P)=1'C_{L3}+7'C_{L9}+1'C_{L6}+1'C_{L5}$$

第三层点火得 $M(E)=1'C_{L9}$ 得出 L9 故障, 诊断结果与文献[18]一致。特别的第二层和第三层点火后 CB1、CB2 和 P 中的剩余托肯均未写出。

本例与第 2 节和 3.1 节例相同, 都是基于 1.2 节的模型, 不需要修改或建立新的库所变迁关系; 在颜色设定上基本相同或相似, 即按定义设定 3 种类型的颜色, 列出 3 种复合色。他们使用的推理规则都是相同的。因此, 以上仿真表明本文建立的模型具有良好的通用性。本方法应用于不同网络拓扑和保护配置的电网故障诊断时均用 3 种单色类型、3 种复合色类型、6 个库所、4 个变迁、9 个有向弧组成推理模型, 按 4 个推理规则进行推理。且对同一电网拓扑改变或保护配置改变时, 仅需增减单色, 修改复合色。

4 结论

本文研究了一种基于有色 Petri 网的电网故障诊断方法。建立了电网故障诊断的有色 Petri 网模型, 讨论了运用该方法对不同拓扑不同保护配置的电网的建模和推理计算, 通过对 110 kV 和 220 kV 典型电网进行仿真验证。得到以下结论:

1) 本方法对简单和复杂故障均能获得正确的诊断结果;

2) 本方法推理计算较简便, 推理速度快, 模型结构不受网络拓扑和保护配置的影响, 是一种通用性较强的电网故障诊断方法。

本方法需要知道完整的保护配置并获得较完整的保护动作信息, 因此在处理不确定和不完备故障信息等方面还需要进一步研究。

参考文献

- [1] 郭创新, 朱传柏, 曹一家, 等. 电力系统故障诊断的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 98-103.
GUO Chuang-xin, ZHU Chuan-bai, CAO Yi-jia, et al. State of arts of fault diagnosis of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 98-103.
- [2] LIN Zhen-zhi, WEN Fu-shuan, Chung C Y, et al. A survey on the applications of Petri net theory in power systems[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2006.
- [3] Lo K L, Ng H S, Trecat J. Power systems fault diagnosis using Petri nets[J]. IEE Proceedings—Generations, Transmissions and Distributions, 1997, 144(3): 231-236.
- [4] 毕天姝, 杨春发, 黄少锋, 等. 基于改进Petri网模型的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2005, 29(21): 52-56.
- [5] BI Tian-shu, YANG Chun-fa, HUANG Shao-feng, et al. Improved Petri net models based fault diagnosis approach for power networks[J]. Power System Technology, 2005, 29(21): 52-56.
- [6] 方培培, 李永丽, 杨晓军. Petri网与专家系统结合的输电网络故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(2): 26-30.
FANG Pei-pei, LI Yong-li, YANG Xiao-jun. Transmission power system fault diagnosis based on Petri nets and expert system[J]. Proceedings of EPSA, 2005, 17(2): 26-30.
- [7] 潘超, 岳建平, 刘冰, 等. 基于适应型Petri网的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 46-50.
PAN Chao, YUE Jian-ping, LIU Bing, et al. An adaptive Petri network based approach to diagnose power network faults[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 46-50.
- [8] 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): 10-15.
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): 10-15.
- [9] SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Yong-hua. Fault diagnosis of electric power systems based on fuzzy Petri nets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 2053-2059.
- [10] LUO Xu, Mladen Kezunovic. Implementing fuzzy reasoning Petri-nets for fault section estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 676-685.
- [11] 任惠, 米增强, 赵洪山. 基于编码PETRI网的电力系统故障诊断模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 20(25): 44-49.
REN Hui, MI Zeng-qiang, ZHAO Hong-shan. Power system fault diagnosis modeling techniques based on encoded Petri nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 20(25): 44-49.
- [12] 田宝江. Petri网理论在电网故障诊断中的应用(硕士学位论文)[D]. 济南: 山东大学, 2008.
TIAN Bao-jiang. Application of Petri net in power grid fault diagnosis, thesis[D]. Jinan: Shandong university, 2008.
- [13] Kurt Jensen. Coloured Petri nets[M]. Heidelberg: Springer Berlin, 1987.
- [14] Yuji Ouchi, Eiichiro Tazaki. Learning and reasoning method using fuzzy coloured Petri nets under uncertainty[J]. Systems, Man, and Cybernetics, 'Computational Cybernetics and Simulation', 1997: 3867-3871.

(下转第127页 continued on page 127)

续上表

时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)	时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)	时间 /h	晴天 /(W/m ²)	晴转多云 /(W/m ²)	雨天 /(W/m ²)
10.22	691.25	723.17	257.76	13.90	737.98	764.21	58.77	17.59	42.22	52.85	0.00
10.25	695.89	727.57	275.11	13.93	735.15	752.13	47.25	17.62	40.56	51.91	0.00
10.27	701.86	731.96	290.25	13.96	732.32	732.54	37.48	17.64	38.89	50.67	0.00
10.30	707.98	736.36	292.07	13.99	729.48	707.90	33.11	17.67	37.23	48.53	0.00
10.33	714.10	740.76	275.39	14.01	725.84	553.62	28.74	17.70	35.56	46.39	0.00
10.36	720.22	745.15	258.71	14.04	720.88	432.69	24.37	17.73	33.90	44.25	0.00
10.38	726.34	749.55	243.22	14.07	715.91	430.27	23.96	17.75	28.87	42.11	0.00
10.41	731.46	751.10	228.30	14.10	710.95	427.86	29.84	17.78	23.74	39.98	0.00
10.44	736.27	752.46	212.30	14.12	705.98	425.45	38.37	17.81	18.90	37.84	0.00
10.47	741.09	753.81	195.03	14.15	701.02	423.03	58.09	17.84	18.62	28.69	0.00
10.49	745.91	755.16	180.71	14.18	694.68	627.55	70.69	17.86	18.33	20.75	0.00
10.52	750.73	756.51	175.11	14.21	687.28	701.62	76.76	17.89	18.05	18.81	0.00
10.55	755.55	757.87	169.51	14.23	679.88	692.90	78.69	17.92	17.77	16.88	0.00
10.58	760.06	759.22	163.71	14.26	672.48	684.17	74.91	17.95	17.49	14.94	0.00
10.60	763.74	760.57	85.31	14.29	665.07	675.45	71.13	17.97	17.21	11.89	0.00
10.63	767.41	766.82	108.55	14.32	657.67	667.78	67.35	18.00	16.92	5.12	0.00
10.66	771.08	773.66	136.16	14.34	650.27	662.17	47.74				

收稿日期: 2009-08-31; 修回日期: 2010-06-11

作者简介:

周念成 (1969-), 男, 博士, 副教授, 从事电力系统自动化和电能质量方面的教学和研究工作;

闫立伟 (1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化和电能质量; E-mail: ylwfly@yahoo.com.cn

王强钢 (1987-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统自动化和电能质量。

(上接第 11 页 continued from page 11)

[14] Francisco G, Santos F, Medeiros E B, et al. Fault diagnosis system for power systems based on coloured Petri nets[C].//The 12th Latin-American Congress on Automatic Control. Salvador(Brazil): 2006: 3-6.

[15] 蔡宏盈. 应用彩色Petri网专家系统于配电系统故障复电策略之研究(硕士学位论文)[D]. 高雄: 国立中山大学, 2003.

CAI Hong-ying. Study on fault restoration strategy of distribution systems with colored Petri net model, thesis[D]. Gaoxiang: National Sun Yat-sen University, 2003.

[16] 袁崇义. Petri网原理与应用[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.

YUAN Chong-yi. Principle and application of Petri net[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2005.

[17] 文福拴, 韩祯祥. 基于遗传算法和模拟退火算法的电力系统的故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14 (3): 29-35.

WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. Fault section

estimation in power systems using genetic algorithm and simulated annealing[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14 (3): 29-35.

[18] 左晓铮. 云南电网“99.5.23”220 kV鲁青线事故分析[J]. 继电器, 1999, 27 (6): 44-48.

ZUO Xiao-zheng. Analysis on the event of 220 kV Luqing line of Yunnan power network in May 23 1999[J]. Relay, 1999, 27 (6): 44-48.

收稿日期: 2009-09-01; 修回日期: 2010-03-05

作者简介:

曾庆锋 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为继电保护和电网故障诊断的算法与仿真; E-mail: sharpqq@yahoo.com.cn

何正友 (1970-), 男, 教授, 主要研究方向为现代信号处理和信息理论在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配电网自动化等。E-mail: hezy@swjtu.cn

杨健维 (1982-), 女, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统故障诊断; E-mail: yangjianwei0910@163.com