

基于加权模糊 Petri 网的电网分层故障诊断方法

程学珍, 林晓晓, 朱春华, 陈 强

(山东科技大学 电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

摘 要: 为了降低模型建立的复杂度, 增强模型的灵活性和通用性, 研究了用于电网故障诊断的分层加权模糊 Petri 网模型, 对系统中的元件分别建立子网和综合诊断两层模型, 并将建立的分层加权模糊 Petri 模型与 Stateflow 元素对应转换, 利用 Simulink 构建故障诊断模型, 结合故障推理算法, 求得元件的故障概率值, 准确判断出故障元件。针对一个典型电网模型进行案例测试, 结果表明, 所建模型和仿真方法简单方便, 具有准确性和通用性。

关键词: 电力系统; 故障诊断; 分层模型; 加权模糊 Petri 网; Stateflow

中图分类号: TM77

文献标志码: A

文章编号: 1672-3767(2017)01-0086-08

Hierarchy Fault Diagnosis Method for Power System Based on Weighted Fuzzy Petri Net

CHENG Xuezheng, LIN Xiaoxiao, ZHU Chunhua, CHEN Qiang

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: To reduce the complexity of model establishment and enhance the flexibility and universality of the model, layered weighted fuzzy Petri net model used for fault diagnosis of power system was studied. For the components of the system, two-layer models of sub network and integrated diagnosis were established respectively. Then the established layered weighted fuzzy Petri net model was converted into Stateflow model by means of the corresponding transformation between elements. With the fault diagnosis model established in Simulink and the fault reasoning algorithm, the failure probability value of the component was obtained and the failure component was diagnosed accurately. The analysis results of the case test of a typical grid model show that the proposed model and simulation method, simple and convenient, is of high accuracy and universality.

Key words: power system; fault diagnosis; layered model; weighted fuzzy Petri net; Stateflow

随着电力系统的快速发展, 电网结构越来越复杂。当电网发生故障时, 准确高效地找出故障点或区域是快速隔离和恢复供电的前提条件, 对提高电能质量和供电系统可靠性具有重大现实意义。

近年来, 学者们提出了许多电网故障智能诊断算法, 如基于专家系统^[1]、基于神经网络^[2]、基于模糊理论^[3]、基于 D-S 证据理论^[4]等故障诊断方法。Petri 网作为离散事件数学表示和行为分析的一种方法, 在解决系统异步并发、分步并行方面存在优势。因此, 一些学者将 Petri 网理论应用到电网故障诊断中^[5]。文献[6-7]对每个元件建立模糊故障 Petri 网模型, 根据收到的警报信息赋予相应的概率值并进行故障推理。文献[8]建立了故障区域的 Petri 网模型, 并对故障模型结构进行了优化设计, 避免矩阵维数过大。文献[9-10]运用加权模糊推理算法的 Petri 网诊断方法, 针对保护和断路器动作对故障诊断的影

收稿日期: 2016-05-23

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(U1261205); 国家自然科学基金项目(61503224); 青岛市黄岛区民生计划项目(2014-2-29)

作者简介: 程学珍(1964—), 女, 山东沂水人, 教授, 博士生导师, 主要从事检测技术及新型传感器、电力系统自动化方面的研究工作, 本文通信作者。E-mail: zhengxc6411@163.com

林晓晓(1990—), 男, 山东潍坊人, 硕士研究生, 主要从事电力系统故障诊断等方面研究。E-mail: 17854284886@sina.cn

响力不同,设定不同的权值建立模糊 Petri 网模型,通过矩阵的简单迭代计算进行模糊推理,提高了模型的容错性。文献[11]研究了一种基于模糊 Petri 网的分层故障诊断方法,利用来自故障录波器和广域监测系统的信息建立具有方向的加权模糊 Petri 网,能够准确获得故障诊断结果。但上述方法计算量大,理论分析复杂。

分析离散事件系统的现代仿真工具 Stateflow 具有可视化的优点,并且在结构上与 Petri 网相似。两者结合能够降低计算难度,便于理论分析。如文献[12]提出 Stateflow 仿真 Petri 网的仿真方法,证明该方法具有简单、通用、扩展性好的特点。文献[13]在 Stateflow 环境下实现了 Petri 网模型的动态可视化仿真,减少了计算量,降低了理论分析的难度。

基于以上分析,本文将 Stateflow 仿真应用到电网故障诊断中,降低了计算难度,提高了模型通用性,便于理论分析。本研究对系统元件建立各方向子网和综合诊断两层模型,考虑不同保护动作、断路器跳闸对诊断的影响不同,对输入弧和输出弧赋予不同的权值。最后,通过 Stateflow 对电网故障诊断过程进行可视化仿真,证明模型的有效性和仿真方法使用简单、通用性强、扩展性好、便于理论分析的特点。

1 加权模糊 Petri 网及其电网故障诊断模型

1.1 基本 Petri 网

库所、变迁及其之间的流通关系可构成一个基本 Petri 网。库所中的托肯(token)表示该库所处的状态,变迁表示在使能状态下对事件的处理,即库所的状态发生变化且达到一定条件时变迁将被触发,托肯将由一个库所转移到下一个库所,使得下一个库所的状态发生改变。

1.2 加权模糊 Petri 网(weighted fuzzy Petri net, WFPN)

加权模糊 Petri 网可定义为一个 8 元组:

$$S_{\text{WFPN}} = \{P, T, C, I, O, T_\lambda, F, P^0\}$$

其中:

- ① $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为一个有限的库所集;用图形“○”表示;
- ② $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ 为一个有限的变迁集,且 $P \cap T = \Phi$;用图形“|”表示;
- ③ $C: P \rightarrow T$, C 为子网的关联矩阵($n \times m$),描述网络的拓扑结构, $C = [c_{ij}]$;当库所 p_i 指向变迁 t_j 时, $c_{ij} = -1$;当变迁 t_j 指向库所 p_i 时, $c_{ij} = 1$;没有关联时, $c_{ij} = 0$;
- ④ I : 输入函数,存在 $I = W \cdot I_1$, 其中, $W = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n)$ 为库所至变迁的权值矩阵, $\omega_n \in (0, 1]$; I_1 为输入矩阵,当库所与变迁相关联时其值为 1, 否则为 0;
- ⑤ O : 输出函数,存在 $O = O_0 \cdot U$, 其中, $U = \text{diag}(u_1, u_2, \dots, u_m)$ 为变迁至库所的权值矩阵, $u_m \in (0, 1]$; O_0 为输出矩阵,当变迁与库所相关联时为 1, 否则为 0;
- ⑥ T_λ 为变迁激发阈值向量,对变迁 t_j 定义激发阈值为 λ_j , 只有当变迁的输入概率 P_i 大于 λ_j 时,变迁才被激发; $T_\lambda(t_j) = \lambda_j, \lambda_j \in [0, 1]$;
- ⑦ $F = \{f_i, f_t, f_o\}$, F 为函数集合, f_i 为概率输入函数、 f_t 为激发变迁函数、 f_o 为概率输出函数^[9], $f_o = e^{-3(x-1)^2}$;
- ⑧ P^0 为各库所初始状态,即各库所初始概率。

1.3 模糊 Petri 网模型的改进

1.3.1 线路模型的改进

为提高模型的灵活性、降低计算量,对各元件(母线、线路、变压器)均建立两层模型。文献[9]对于线路,分 3 层建模,第 1 层为送端(或受端)主保护、近后备保护、远后备保护 3 个子网,第 2 层为基于 3 个子网的单侧综合子网,最后基于两侧故障诊断概率的线路综合诊断模型,本文方法相对于文献[9]改进了线路模型,将线路模型分为两层:第一层为各蔓延方向的模型,第二层为送端跟受端综合诊断模型。此方法不仅降低矩阵维数,减少计算量,还提高模型的通用性,当系统拓扑结构变化时,只需要增减第一层模型中相应蔓延方向子模型和第二层模型输入库所个数,按输入库所数目修正第二层模型输入弧权值即可,模型和矩阵调整较小。

1.3.2 变迁阈值的选定

定义变迁阈值为 λ_j , 只有变迁上输入概率大于变迁阈值时, 变迁才会发生, 对应输入概率不变, 否则置 0, 变迁阈值大小影响到模糊 Petri 网的容错能力, 阈值越小, 容错能力越强, 所以本文选择阈值为 0.1。

1.3.3 权值的设定

在建模过程中, 考虑到元件故障后, 首先主保护动作, 随后跳开相应断路器, 若主保护拒动, 则由后备保护动作。因此, 取保护至变迁输入弧所占权重为 0.55, 断路器至变迁输入弧对应权重为 0.45, 主保护、近后备保护、远后备保护以及相应断路器组成的支路模型权重依次为 1、0.95、0.85。综合诊断模型输入弧权值为 $1/n$, 与文献[9]相比, 不再考虑线路两端不同保护对诊断的影响, 降低修正的复杂性与计算难度。

1.4 WFPN 电网模型的建立

将 WFPN 应用于电网故障诊断中, 用图形化的形式表示元件与保护之间的关系, 能更加直观地了解故障状态和信息。

以图 1 所示的电网测试图^[14]为例, 建立各元件 WFPN 模型, 具体模型见附录。该系统中所含元件可分为以下四种: 母线 B、变压器 T、断路器和线路 L。

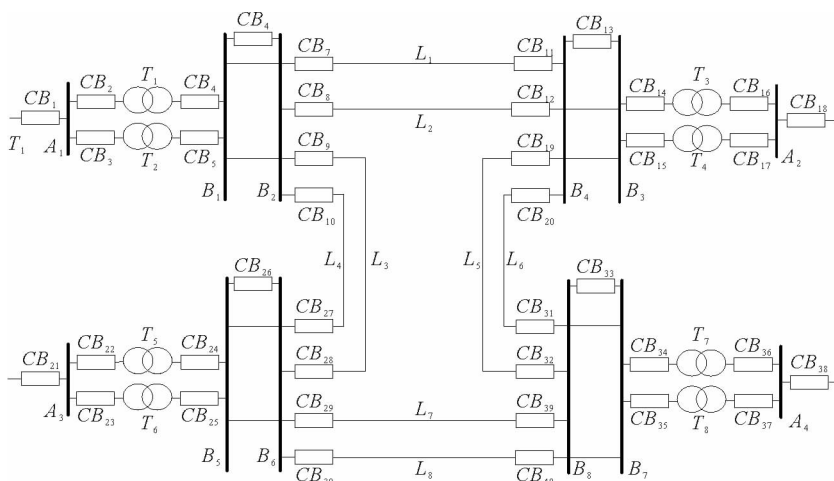


图 1 电力系统测试图

Fig. 1 Test diagram of power system

1.5 WFPN 电网故障模型推理过程

WFPN 电网故障模型推理过程具体如下:

- 1) 根据采集到的故障信息, 搜索可疑元件, 对可疑元件建立诊断模型, 对诊断模型中相应库所进行赋初始值 P^0 , 按照文献[15]设定初始概率, 不动作时设为 0.2。
- 2) 首先计算输入概率 $E = f_i(P^0)$, 其次激发变迁 $H = f_i(E)$, 最后推算输出概率列向量 $G = f_o(H)$ 。
- 3) 计算库所的下一个状态 $P^1 = G \cdot O$ 。如果库所下个状态概率值大于 1, 则返回上层取极值。
- 4) 元件对应库所概率若大于 0.75^[9], 判断为故障。

以图 2 为例进行说明如下: 设定库所 p_1 代表继电保护, 其概率值为 0.856 4; 库所 p_2 代表断路器, 其概率值为 0.983 3; 权值 $w_1 = 0.55, w_2 = 0.45, u_1 = 1$; 变迁阈值为 0.1。库所 p_1 和 p_2 中均存在初始标识(token), 变迁满足触发条件, 根据变迁输入累加概率计算公式可求其概率值为 0.913 5, 经过变迁阈值比较后仍为 0.913 5。此时库所 p_3 得到初始标识, 且其概率值为 0.977 8(经过函数修正)。推理结束, 表明该库所所对应的元件发生故障的概

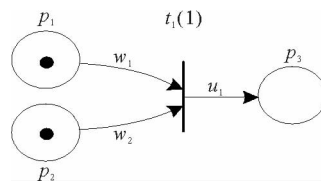


图 2 模型原理图

Fig. 2 Principle diagram of the model

率为 0.977 8。

2 电网故障诊断的 Stateflow 建模

利用 Matlab 中的 Stateflow 进行建模,Stateflow 是以有限状态机(finite state machine)理论为基础的图形化建模仿真工具,采用面向对象的编程思想,即属性、事件和方法,用图形的方式对系统进行建模、仿真和分析。

建立模型具体步骤如下:

1) 在 Simulink 中插入 Chart 模型,双击点开进行搭建。

2) 建立对应关系。把模糊 Petri 网模型中的库所和变迁对应到 Stateflow 中的状态和迁移连线, Petri 网变迁的发生条件对应 Stateflow 中迁移关系式,通过迁移关系式实现算法推理过程(推理过程见 1.4)。

3) 根据其对应的变迁,设定 Stateflow 中的每个状态动作;

4) 依照变迁激发顺序,用迁移连线依次连接各个状态,如图 3 所示;

5) 按需要进行输入输出端口设置,需要初始化的状态可以通过 Chart 模块的输入端口设置,需要观察的结果可以设为 Chart 的输出以便显示、读取,模型图如图 4 所示;

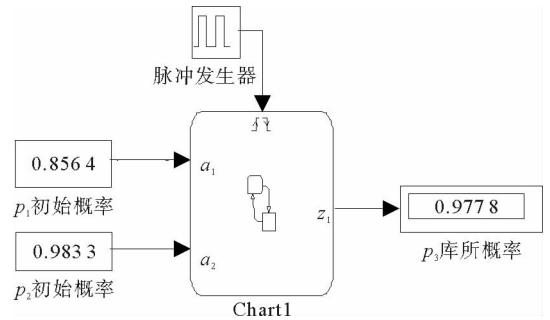


图 3 模型图

Fig. 3 Model chart

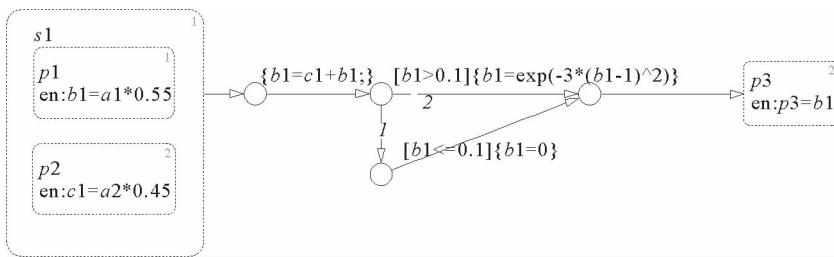


图 4 Chart 内部图

Fig. 4 Inner structure of Chart

6) 运行仿真,从示波器读取结果。

选择图 2 模型原理图进行仿真说明,搭建的模型如图 3 所示,Chart 内部如图 4 所示。

图 3 中, a_1, a_2 为 Chart 外部输入事件初始概率,对应于 Petri 模型中的初始库所。通过 Constant 模块对其赋予初始值 $a_1=0.8564$ 和 $a_2=0.9833$; z_1 为 Chart 输出事件发生的概率;脉冲发生器用来触发迁移。

图 4 中, p_1 和 p_2 两个状态对应于图 2 中 p_1 和 p_2 两个库所,两个状态并列运行状态,用虚线框表示。当进入状态时,对状态对应的初始概率值进行加权运算,产生新的概率值。状态 p_1 概率值权值为 0.55,经过运算对应概率值 b_1 为 0.471;状态 p_2 概率值权值为 0.45,经过运算对应概率值 c_1 为 0.4425。并列运行后通过迁移关系式将两者求和,如果概率值大于设定的变迁阈值 0.1,则通过修正函数进行修正,否则将概率值设定为 0,将概率值传送下一个库所 p_3 (状态),即获得库所 p_3 对应事件发生的概率。

Stateflow 仿真过程中,运行的状态或者迁移都处于加粗状态,可以直观地展现状态转移先后顺序以及转移到下一状态所走的路径。同时,可以将需要观察的中间变量概率值设定为输出变量,通过示波器直接显示出来。因此,本文仿真方法更加直观方便地将故障诊断过程展现给工作人员,有利于推断每个子方向处于故障还是非故障状态以及对断路器和保护动作信息进行评判。

3 算例仿真验证与分析

以图 1 所示的典型电力系统图进行算例验证(具体 WFPN 模型见附录)。

案例 1^[16]: 保护动作信息: B_{1m} 、 SL_{2rs} 、 SL_{4rs} 动作; 断路器动作信息: CB_4 、 CB_5 、 CB_7 、 CB_9 、 CB_{12} 、 CB_{27} 跳闸。搜索到可疑元件为 B_1 、 B_2 、 L_2 、 L_4 建立其故障诊断模型。

参照 B_1 在 L_2 方向的故障诊断子网(附录 1(3)), 根据收集信息 B_{1m} 、 SL_{2rs} 动作, CB_8 未跳闸, CB_{12} 跳闸, 则对应的库所初始概率分别赋值为 0.856 4、0.7、0.2、0.75。因此可确定 L_2 方向子模块输入初始值为 $\mathbf{P}^0 = [0.866\ 4\ 0.2\ 0.7\ 0.75\ 0\ 0\ 0]$; 同理, 可得 T_1 、 T_2 方向子模块输入初始值为 $\mathbf{P}^0 = [0.866\ 4\ 0.983\ 3\ 0.2\ 0.75\ 0\ 0\ 0]$, L_1 和 L_3 方向子模块输入初始值为 $\mathbf{P}^0 = [0.866\ 4\ 0.983\ 3\ 0.2\ 0.2\ 0\ 0\ 0]$, L_4 方向初始概率值与 L_2 相同。

以 B_1 在 T_1 方向的故障诊断子网(附录 1(1))为例进行仿真说明, 一个 Chart 模型有四个输入端, 输入概率初始值 $[0.856\ 4\ 0.983\ 3\ 0.2\ 0.75]$, 内部如图 5 所示。上半部分由主保护 B_{1m} 和断路器 CB_4 动作信息为初始条件, 二者并列运行, 进入对应模型中的状态时进行加权计算。将产生的新概率值求和, 通过判断迁移关系式选择到达下一个状态的路径, 如果概率值大于阈值 0.1, 进行修正计算; 与此同时, 下半部分由 T_{1s} 、 CB_4 为初始条件的推理过程同步进行。两部分计算完以后经过状态 p_3 将两部分概率值加权求和, 判断最终概率值是否大于 1, 如果大于 1, 取极值, 否则直接输出结果。

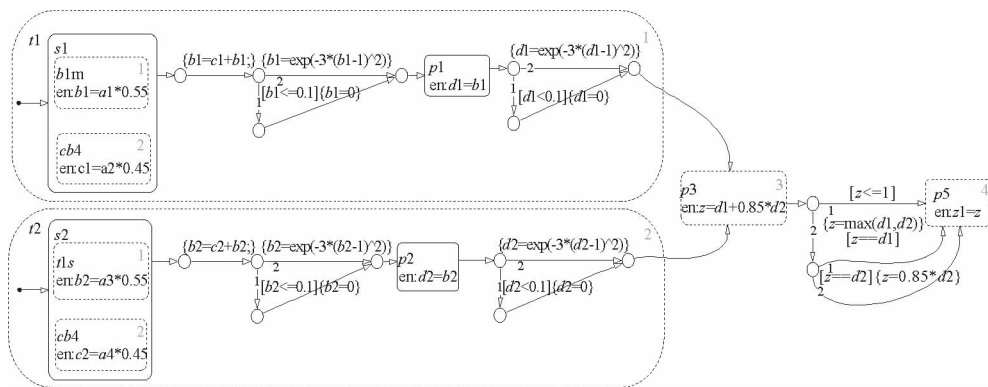


图 5 T_1 方向 Chart 内部图

Fig. 5 Inner structure of Chart on T_1 direction

整体模型仿真结果如图 6 所示。分两层, 第一层为各子网诊断模型, 第二层为综合诊断模型, 计算流程如下:

1) 执行一次变迁触发后, 仿真结果显示 L_2 、 L_4 方向 p_1 和 p_2 对应的概率值为 0.561 和 0.793 7(对应图 6 中 $t_1(1)$ 和 $t_1(2)$ 显示结果)。 L_1 、 L_3 方向 p_1 和 p_2 对应概率值为 0.977 8 和 0.407 5, T_2 、 T_1 方向 p_1 和 p_2 对应概率值为 0.977 8 和 0.146 6。

2) 执行第二次变迁触发后, 仿真结果显示 L_2 、 L_4 方向对应的概率值为 0.748 1(对应图 5 中 t_2 显示结果)。 T_2 、 T_1 、 L_1 和 L_3 方向对应概率值为 0.998 5。

3) 综合模型的初始库所向量为第一层模型结果, 即 $\mathbf{P}^0 = [0.998\ 5\ 0.998\ 5\ 0.998\ 5\ 0.998\ 5\ 0.748\ 1\ 0.748\ 1\ 0]$;

4) 终态库所对应概率值为 0.978 6(对应图 6 中第二层综合诊断结果), 即双母线 B_1 发生故障的概率值为 $0.978\ 6 > 0.75$, 可知该元件发生了故障。

同理 B_2 、 L_2 、 L_4 故障概率分别为 0.458 32、0.372 47、0.372 47。

对于算例 2 多重故障情况及算例 3 信息缺失情况, 诊断结果见表 1, 在此不再赘述推理过程。

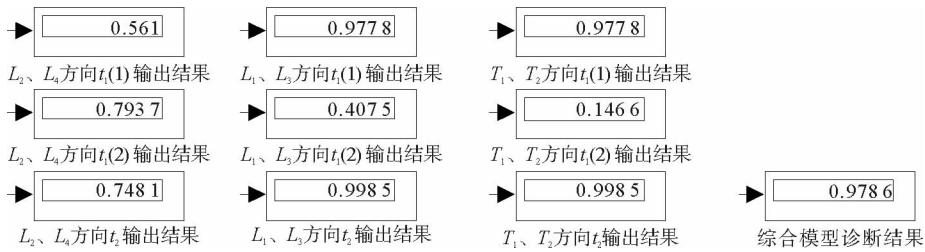


图 6 模型仿真结果

Fig. 6 Result of model simulation

表 1 算例诊断结果

Tab. 1 Result of case diagnosis

案例序号	保护动作信息	断路器跳闸信息	文献[16]诊断结果	本文诊断结果
2 多重故障	$B_{1m}, B_{2m}, L_{1sm}, L_{1Rp}, L_{2sp}, L_{2Rm}$	$CB_4, CB_5, CB_6, CB_7, CB_8, CB_9, CB_{10}, CB_{11}, CB_{12}$	B_1	$B_1(0.9999)$
			B_2	$B_2(0.9999)$
			L_1	$L_1(0.9960)$
			L_2	$L_2(0.9960)$
3 B_{1m} 信息丢失	L_{1Rs}, L_{2Rs}	$CB_4, CB_5, CB_7, CB_9, CB_{12}, CB_{27}$	B_1	$B_1(0.86092)$

算例分析结果显示,本文模型与仿真方法在系统发生单重故障、多重故障或信息丢失情况下都能准确判断出结果。与文献[9]方法的比较结果如表 2 所示。

表 2 与文献[9]方法的比较

Tab. 2 Comparison with method in literature [9]

比较项目	文献[9]方法	本文方法
模型	线路模型分为三层	简化为两层,减少矩阵的重复设计,降低矩阵调整的难度。
计算量	普通矩阵计算,但考虑线路送受端不同保护作用不同,需要随时调整权重,过程复杂。	普通矩阵计算,第二层模型输出权重均等,调整量小,过程简单。
其他		Stateflow 辅助设计,能直观地观察状态信息和转换过程,便于理论分析,方便以后理论创新。

通过上述分析可以看出,本文所建立的模型具有较好的灵活性和通用性,大大简化了模型修正过程,降低了计算量。通过 Stateflow 进行仿真,处于运行或者迁移状态都为加粗状态,可以直观地展现状态转移先后顺序以及转移到下一状态所走的路径。同时,可以将需要观察的中间变量概率值设定为输出变量,通过示波器直接显示出来,便于快速诊断出故障发生点。

4 结束语

本文研究了一种基于 Stateflow 的 WFPN 电网故障分析及诊断方法,对分层模糊 Petri 网故障诊断模型进行改进。通过 Stateflow 软件辅助设计,直观地观察状态之间的转换。以典型电网测试图为例,通过算例仿真及结果分析表明,本文提出的方法提高了模型灵活性、适应性和通用性,减少了计算量,更加直观地展现了推理过程。对提高电网故障诊断准确性和快速性具有一定的指导意义和应用价值。

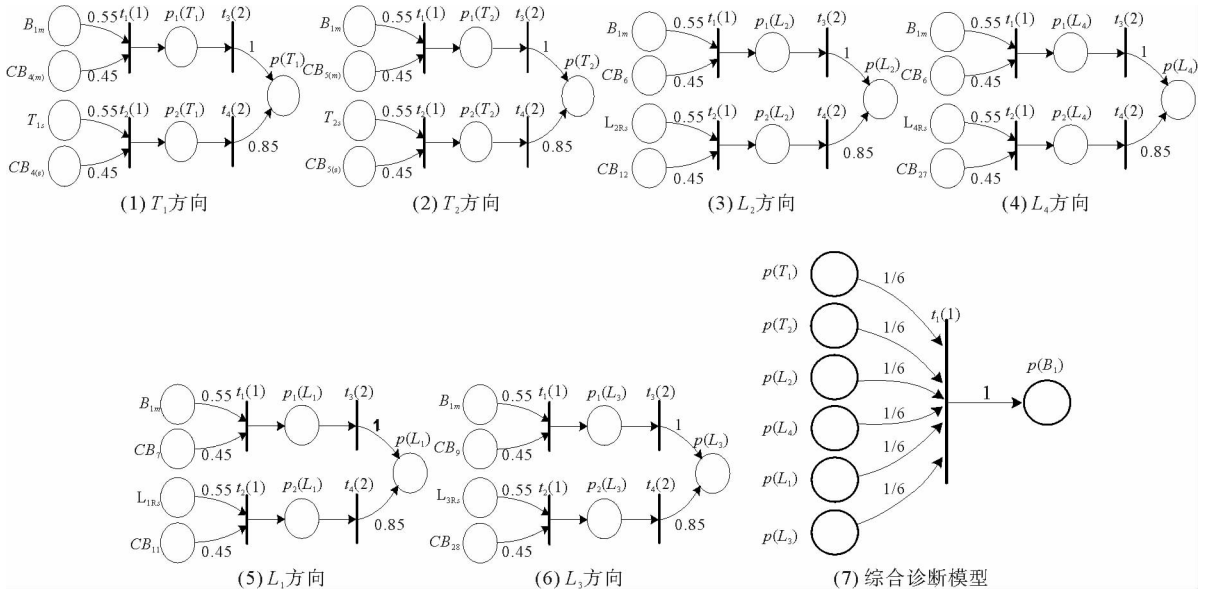
参考文献:

[1] 赵伟,白晓民,丁剑,等. 基于协同式专家系统及多智能体技术的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(20): 1-8.

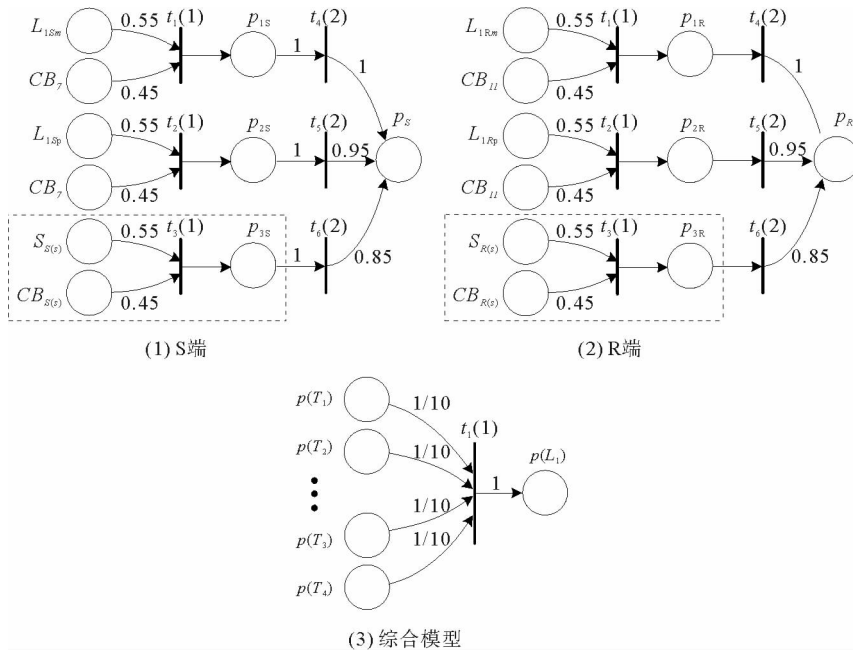
- tem and multi-agent technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 1-8.
- [2] 杨凌霄, 朱亚丽. 基于概率神经网络的高压断路器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 62-67.
YANG Lingxiao, ZHU Yali. High voltage circuit breaker fault diagnosis of probabilistic neural network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 62-67.
- [3] 张钧, 李小鹏, 何正友. 采用自适应神经模糊推理系统的配电网故障分类方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 87-93.
ZHANG Jun, LI Xiaopeng, HE Zhengyou. Fault classification technique for power distribution network using adaptive network based fuzzy inference system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 87-93.
- [4] 张阳, 何正友, 林圣. 一种基于DS证据理论的电网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(9): 5-10.
ZHANG Yang, HE Zhengyou, LIN Sheng. A power system fault diagnosis method based on DS evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36(9): 5-10.
- [5] 刘妹琴, 王毅星. 基于Petri网与D-S证据理论的电力系统故障诊断[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2014, 42(10): 88-92.
LIU Meiqin, WANG Yixing. Power system fault diagnosis based on Petri Net and D-S evidence theory[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2014, 42(10): 88-92.
- [6] 程学珍, 王程, 于永进, 等. 一种基于模糊故障Petri网的三相异步电动机故障分析方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(17): 132-139.
CHENG Xuezheng, WANG Cheng, YU Yongjin, et al. An approach for three-phase asynchronous motor failure analysis based on fuzzy fault Petri Net[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(17): 132-139.
- [7] SUN J, QIN S Y, SONG Y H. Fault diagnosis of electric power systems based on fuzzy Petri-nets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4): 2053-2059.
- [8] XU L, KEZUNOVIC M. Implementing fuzzy reasoning Petri-nets for fault section estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 676-685.
- [9] 谢洪涛, 童晓阳. 基于分层模糊Petri网的电网故障综合诊断方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 247-252.
XIE Hongtao, TONG Xiaoyang. A method of synthetical fault diagnosis for power system based on fuzzy hierarchical Petri net[J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 247-252.
- [10] 杨健维, 何正友, 臧天磊. 基于方向性加权模糊Petri网的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 42-49.
YANG Jianwei, HE Zhengyou, ZANG Tianlei. Power system fault-diagnosis method based on directional weighted fuzzy Petri nets[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 42-49.
- [11] WANG Y N, YE J F, XU G J, et al. Novel hierarchical fault diagnosis approach for smart power grid with information fusion of multi-data resources based on fuzzy Petri net[C] // IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Beijing, 2014: 1183-1189.
- [12] 陶继平, 徐文艳, 杨根科, 等. 基于Stateflow的Petri网仿真方法[J]. 计算机仿真, 2006, 23(12): 96-99.
TAO Jiping, XU Wenyan, YANG Genke, et al. A simulation method of Petri nets based on Stateflow[J]. Computer Simulation, 2006, 23(12): 96-99.
- [13] 程立, 张健欣, 赵海龙. 基于Stateflow的赋时Petri网仿真实现方法[J]. 计算机仿真, 2013, 30(2): 378-382.
CHENG Li, ZHANG Jianxin, ZHAO Hailong. Simulation method of Petri nets based on Stateflow[J]. Computer Simulation, 2013, 30(2): 378-382.
- [14] 刘道兵, 顾雪平, 梁海平, 等. 电网故障诊断完全解析模型的解集评价与最优解求取[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(31): 5668-5676.
LIU Daobing, GU Xueping, LIANG Haiping, et al. Solution evaluation and optimal solution discrimination of a complete analytical model for power system fault diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5668-5676.
- [15] 张林. 基于模糊Petri网的电力系统故障诊断[D]. 南昌: 南昌大学, 2007.
- [16] 梅念, 石东源, 李银红, 等. 计及信息畸变影响的电网故障诊断分级优化方法[J]. 电工技术学报, 2009, 24(9): 179-185.
MEI Nian, SHI Dongyuan, LI Yinong, et al. Power system fault diagnosis based on gradual optimization in consideration of alarm information aberrance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(9): 179-185.

附录:

1. 母线 B_1 模糊 Petri 网模型



2. 线路 L_1 模糊 Petri 网模型



虚线框中库所对应于远后备保护中的 (T_{1s}, CB_4) 、 (T_{2s}, CB_5) 、 (L_{2Rs}, CB_{12}) 、 (L_{3Rs}, CB_{28}) 、 (L_{4Rs}, CB_{27}) 和 (T_{3s}, CB_{14}) 、 (T_{4s}, CB_{15}) 、 (L_{2Ss}, CB_8) 、 (L_{5Ss}, CB_{32}) 、 (L_{6Ss}, CB_{31}) 。注:变压器模型与线路相似,不再画出。