

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902545

时间约束的改进分层模糊 Petri 网的 配电网故障诊断方法*

袁川来 廖庸邑 孔玲爽 刘建华

(湖南工业大学 电气与信息工程学院 株洲 412000)

摘要:配电网发生故障后,迅速利用大量的告警信息判别出故障元件,能为调度中心的工作人员提供重要的决策支持。针对现有 Petri 网的故障诊断方法未应用在配电网中的问题,提出了一种时间约束的改进分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断方法。对配电网中的可疑故障元件建立改进的分层模糊 Petri 网模型,能够适应网络拓扑结构的变换,利用获得的报警信息通过反向和正向时序推理对保护和断路器进行时序检查,对不满足时间约束的库所进行置信度修正。给出了改进分层模糊 Petri 网模型的推理流程及矩阵推理算法,在矩阵推理过程中引入高斯函数修正概率,使概率始终保持在 0~1,最终得到故障元件的置信概率及其时间点约束。通过对配电网系统算例的比较、分析,验证了所提方法的正确性和合理性,能够有效地诊断出配电网的故障元件。

关键词:故障诊断;时序推理;分层模糊 Petri 网;配电网

中图分类号: TM711 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.40

Improved hierarchical fuzzy Petri net with temporal constraints for distribution network fault diagnosis

Yuan Chuanlai Liao Yongyi Kong Lingshuang Liu Jianhua

(School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000, China)

Abstract: After distribution network failure, a large number of alarm information will be generated. These information can be used to identify the faulty components quickly, and hence providing important decision support for dispatching center staff. Since the existing fault diagnosis methods of Petri nets are not applied in the distribution network, an improved hierarchical fuzzy Petri nets fault diagnosis method based on temporal constraints is proposed. An improved hierarchical fuzzy Petri net model for suspected fault component in distribution network is established, which can adapt to the change of network topology. The obtained alarm information is used to check the sequence of protection and circuit breakers by reverse and forward temporal reasoning, and the confidence of the transitions that does not meet the time constraints is corrected. The reasoning process and the matrix reasoning algorithm of the improved hierarchical fuzzy Petri net model are given. In the process of matrix reasoning, the modified probability of Gauss function is introduced to keep the probability at 0~1. Finally, the confidence probability of the fault components and its temporal point constraint are obtained. Through the comparison and analysis of the distribution network system examples, the correctness and rationality of the proposed method are verified, and the fault components of the distribution network can be effectively diagnosed.

Keywords: fault diagnosis; temporal reasoning; hierarchical fuzzy Petri net; distribution network

0 引言

当配电网发生故障后,利用大量的告警信息迅速诊断出故障元件可以加快系统的恢复。目前使用的电网故

障诊断方法主要包括基于人工神经网络^[1]、专家系统^[2]、遗传算法^[3-4]以及 Petri 网^[5]的方法。由于 Petri 网推理过程简洁明了,并且故障诊断速度快、物理意义清晰,故一直是电网故障诊断领域的研究热点。

近年来,为解决故障诊断中不确定性的问题,国内学

者提出基于模糊 Petri 网的故障诊断方法,采用概率的形式来描述保护和断路器动作信息的不确定性,对电网中的各个元件进行故障诊断。在此基础上,文献[6]建立故障元件的模糊 Petri 网模型,并对其进行优化,优化了推理流程,提高了故障诊断的效率;文献[7]提出了一种将故障元件的模糊 Petri 网模型进行分层、简化的方法,降低了 Petri 网的规模,减少了计算量。为了消除错误告警信息对故障诊断结果的影响,提高诊断准确性,文献[8]利用保护和断路器动作信息的时序特性,建立时序关联矩阵,对不完备的告警信息进行纠错处理;文献[9]对获得的保护和断路器告警信息的时序进行交叉检查,能够筛选异常信息并修正诊断模型;文献[10]考虑设备故障到相应保护动作的时间距离,将时序约束网络和模糊 Petri 网进行融合,过滤掉错误的告警信息,提高了故障诊断结果的准确性。

上述基于 Petri 网的故障诊断方法具有一定的容错性和适应性,但还未将其应用在有源配电网中。由于不含分布式电源的传统配电网发生故障时,只有主电源 S 向配电网中注入短路电流,故障诊断比较简单。然而当含分布式电源的配电网发生故障时,主电源 S 和分布式电源 DG 都会向配电网中注入短路电流,故障诊断变得复杂,传统的配电网故障诊断方案可能会发生误判,因此传统的故障诊断方法不再适用。本文提出了一种时间约束的改进分层模糊 Petri 网(HFPN)故障诊断方法,将其应用在配电网的故障诊断中,考虑配电网结构的拓扑变化,对线路进行分层建模,提高模型的通用性和灵活性。对获得的保护和断路器的告警信息进行时序检查,筛选出时序不一致的告警信息,修正其初始置信度。为减少推理过程的计算量以及诊断结果的准确度,将变迁集合分为两层,并优化推理算法。通过算例分析、比较验证了该方法的合理性和有效性。

1 时间约束的改进分层模糊 Petri 网

1.1 基本定义

考虑告警信息的时间约束特性,将 Petri 网定义为一个 8 元组 $S = (N, L, P, R, I, O, R_s, \alpha)$ 。

1) N 为变迁的层数。

2) L 为子网所在的层数,本文单侧保护线路模型为一层;双侧保护线路模型为两层,第 1 层模型的变迁层数 $N = 2$,第 2 层模型的变迁层数 $N = 1$ 。

3) P 为库所集合, $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 。

4) R 为变迁集合, $R = \{r_1, r_2, \dots, r_m\}$ 。

5) $I: P \rightarrow R, I$ 为各库所到相应变迁的输入弧权值矩阵 ($n \times m$), $I_{ij} \in [0, 1]$, 当存在从库所 p_i 到变迁 r_j 的有向弧时, I_{ij} 的值为该有向弧的权值,否则 $I_{ij} = 0$ 。

6) $O: R \rightarrow P, O$ 为各变迁到相应库所的输出弧权值矩阵 ($n \times m$), $O_{ij} \in [0, 1]$, 当存在从变迁 r_j 到库所 p_i 的有向弧时, O_{ij} 的值为该有向弧的权值,否则 $O_{ij} = 0$ 。

7) $R_s = \{R_l, R_\lambda, R_c\}$, 其中 $R_l = \alpha I$ 为变迁的置信度向量; R_λ 为变迁激发阈值向量, $R_\lambda(r_j) = \lambda_j, \lambda_j \in [0, 1]$; $R_c = R_l \cdot R_\lambda$, 当 $R_l(r_j) > \lambda_j$ 时, 变迁输入置信度不变, 否则为 0。

8) $\alpha = [\alpha(p_1), \alpha(p_2), \dots, \alpha(p_n)]^T$ 为库所置信度向量, $\alpha(p_i)$ 为库所 p_i 发生的置信度, 且 $\alpha(p_i) \in [0, 1]$, $i = 1, 2, \dots, n$ 。利用高斯函数 $f(x) = e^{-3(x-1)^2}$ 计算变迁输出概率^[8], x 为一概率值, 并有 $\alpha^N = f(R_c^{N-1} \cdot O^T)$ 。当 $N = 0$ 时, 表示库所初始置信度向量 α^0 , 当 $N \geq 1$ 时, 表示当前层变迁点火后对应的库所终态向量 α^N 。

1.2 时间约束的定义

文献[11]使用两类时序约束描述电网故障事件的时间特性。用 $T(a) = [t_a^-, t_a^+]$ 表示时间点约束, 其中 t_a^- 和 t_a^+ 分别为 $T(a)$ 的起点和终点, 若 $t_a^- = t_a^+$, 则 t_a 为一个确定的时间点, 表示事件 a 的发生时刻 t_a 。 $d(t_a, t_b) = t_b - t_a$ 表示 t_a 和 t_b 之间的时间距离。用 $D(t_a, t_b) = [\Delta t_{ab}^-, \Delta t_{ab}^+]$ 表示时间距离 $d(t_a, t_b)$ 的约束, $d(t_a, t_b) \in D(t_a, t_b)$, 其中 Δt_{ab}^- 和 Δt_{ab}^+ 分别为 $D(t_a, t_b)$ 的起点和终点。

当配电网发生故障后, 调度中心收到的告警信息主要包括主保护、后备保护和断路器动作信息及其发生的时刻。定义 t_R, t_{CB} 分别为保护动作时刻和断路器跳闸时刻, $D(t_R, t_{CB})$ 为各保护到其对应断路器的时间距离约束, $D(t_v, t_R)$ 为原因事件到保护动作告警信息的时间距离约束, $D(t_v, t_m), D(t_v, t_p), D(t_v, t_s)$ 分别表示主保护、近后备保护、远后备保护动作相对于原因事件的时间距离约束。不同的保护动作时刻和断路器跳闸时刻设定了不同的动作时延时。设定的各时间距离约束为^[12]:

$$D(t_v, t_m) = [10, 40] \quad (1)$$

$$D(t_v, t_p) = [260, 340] \quad (2)$$

$$D(t_v, t_s) = [950, 1070] \quad (3)$$

$$D(t_R, t_{CB}) = [20, 40] \quad (4)$$

其中, 时间距离单位为 ms。

模糊 Petri 网模型中所有告警信息的时间距离约束都可以用原因事件表示^[13], 断路器跳闸告警信息相对于原因事件的时间距离约束为:

$$D(t_v, t_{CB}) = D(t_v, t_R) + D(t_R, t_{CB}) \quad (5)$$

1.3 含分布式电源的配电网保护原理

图 1 为传统配电网加入分布式电源的系统结构图。当分布式电源上游发生故障 f_1 时, 主电源 S 和分布式电源 DG_1 都会向配电网中注入短路电流, 若只断开 CB_1 , 则分布式电源 DG_1 还会对故障点提供短路电流, 因此需要

同时断开 CB_1 和 CB_3 , 分布式电源上游使用双侧保护的方法。在分布式电源接入点的上游每条线路的远电源侧配置保护和断路器^[14]。当分布式电源下游发生故障 f_2 时, 故障点电流为主电源 S 和分布式电源 DG_1 同时提供并流过 CB_4 的故障电流, 因此线路 L_2 的主保护断开 CB_4 , 分布式电源下游使用单侧保护的方法。当 L_3 发生故障时, 主电源 S 和分布式电源 DG_1 注入的短路电流经线路 L_2 流入, 因此其远后备保护只需要断开 CB_4 。

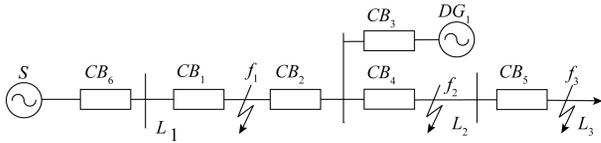


图 1 传统配电网加入分布式电源的系统结构

Fig.1 System structure diagram of traditional distribution network adding distributed generation

1.4 时间约束的改进 HFPN 配电网故障诊断模型

一个简单的配电网系统结构如图 2 所示, $CB_1 \sim CB_{29}$ 为断路器, $DG_1 \sim DG_6$ 为分布式电源, $L_1 \sim L_{15}$ 为线路。

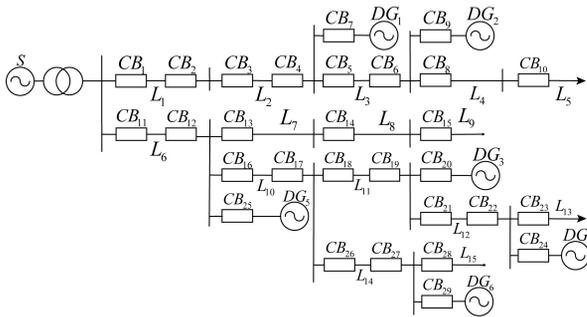


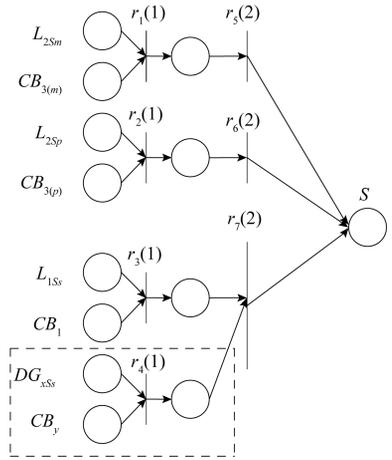
图 2 配电网系统结构

Fig.2 Distribution network system structure

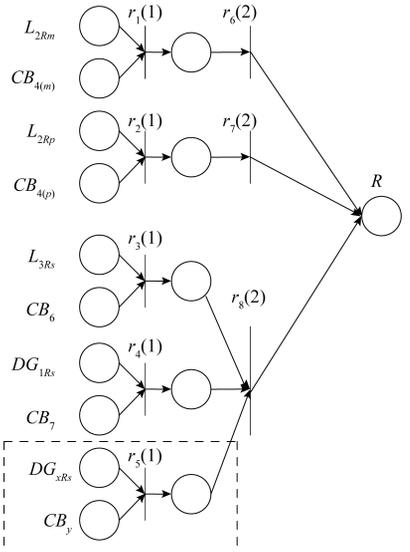
当配电网的网络拓扑结构发生变化时, 传统 Petri 网的建模方式将不再适用, 因此本文选用分层建模的方法, 建立线路的改进分层模糊 Petri 网模型。本文在建立配电网模型时对元件的保护配置考虑如下: 每条线路都配备了主保护、近后备保护、远后备保护和相应的断路器。

对于图 2 的线路 L_2 , 建立的改进分层模糊 Petri 网模型如图 3 所示, 其分层模糊 Petri 网模型可分为两层。第一层为线路 L_2 送端、受端的子网模型; 第 2 层为送端和受端的综合模型。当某一变迁 r 处于第 N 层时, 其编号设置为 $r(N)$ 。对于图 3 (a)、(b) 的模型, 变迁数 $N = 2$ 。

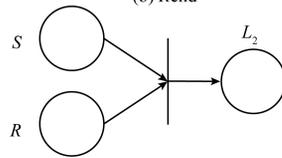
图 3 中, S 和 R 分别表示线路 L_2 的送端、受端, m, p, s 分别表示线路的主保护、近后备保护和远后备保护。



(a) S端
(a) Send



(b) R端
(b) Rend



(c) 综合模型
(c) Comprehensivemode

图 3 线路 L_2 的改进 HFPN 模型

Fig.3 Improved HFPN model of line L_2

L_{2Rm} 表示线路 L_2 的受端主保护。当配电网元件个数发生变化时, 只需对图中所示的虚线模块增加或去除相应的模型即可, 调整较小, 不会对整体的建模造成影响, 因此对网络拓扑结构变化具有良好的适应性。

分布式电源下游为单侧保护, 因此不分送端和受端。当图 1 的线路 L_2 发生故障时, 其远后备保护对应的断路器为 CB_1 和 CB_3 , 建立的模糊 Petri 网模型如图 4 所示。

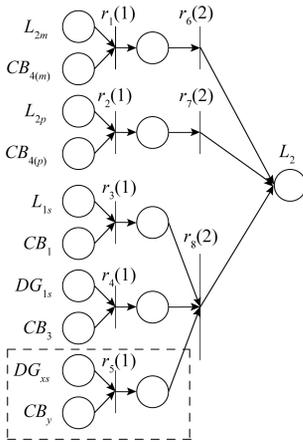


图4 线路 L_2 的模糊 Petri 网模型

Fig.4 Fuzzy Petri net model of line L_2

2 时间约束的改进 HFPN 模型参数设置及推理过程

2.1 变迁输入弧和输出弧的权值分配

本文将初始库所到变迁的两条输入弧的权值设为 0.6 和 0.4, 中间库所到变迁的输入弧的权值为 1。在综合模型中, 变迁的两条输入弧的权值都为 0.5。为了区别各保护及其对应的断路器对故障诊断的不同影响, 对主保护、近后备保护和远后备保护的变迁输出弧权值依次设为 1、0.95、0.85。对于含多个中间库所输入的变迁, 其输入弧权值为最初设定的 $1/n$, 对应的第一层变迁输出弧权值仍为最初设定的 $1/n$, n 表示此变迁对应的中间库所数。如图 4 中的变迁 $r_3(1)$ 对应的输入弧权值分别为 0.3 和 0.2, 输出弧权值为 0.425; 变迁 $r_4(1)$ 对应的输入弧权值分别为 0.3 和 0.2, 输出弧权值为 0.425; 变迁 $r_8(2)$ 对应的输入弧权值分别为 0.5 和 0.5, 输出弧权值仍为 0.85。

2.2 库所初始置信度的设定

配电网发生故障后, 调度中心收到的告警信息可能存在不确定性, 因此对各保护和断路器对应的库所赋予不同的初始置信度^[9], 如表 1 所示。

表 1 保护和断路器对应库所的初始置信度

Table 1 Initial confidence of protection and circuit breaker corresponding places

	主保护	近后备保护	远后备保护
保护	0.991 3	0.8	0.7
断路器	0.983 3	0.85	0.75

对未收到告警信息的保护和断路器对应的库所初始置信度均设为 0.2, 中间库所和最终库所的初始置信度都为 0。

2.3 算法的改进

文献[15]采用的算法推理过程复杂, 计算量大。文献[16]采用的算法, 虽然推理过程简单, 但是忽略了未收到告警信息的保护和断路器对整个过程的影响, 变迁阈值取值过大, 并且得到的元件最终置信度会出现 ≥ 1 的情况。本文在推理过程中, 考虑未收到告警信息的保护和断路器对整个过程的影响, 对时序推理过程进行优化。变迁阈值取值较小时可以提高模糊 Petri 网的容错性能^[17], 因此通过数据分析, 本文模型中的变迁阈值为 $\lambda_j = 0.1$ 。本文采用分层变迁的推理算法, 分层变迁按顺序触发, 在推理过程中引入了高斯函数, 使元件的最终置信度始终维持在 $(0, 1)$, 计算结果更加准确。

文献[16]在时序推理方面, 只使用主保护和其对应的断路器的时间距离约束进行推理, 并以此来检查收到的告警信息, 得到的诊断结果不准确。本文使用各保护和断路器的时间距离约束对收到的告警信息分别进行时序推理, 并检查相应的告警信息, 对不满足时间约束的信息进行修正。

本文对故障元件进行分层建模, 并对模型进行优化, 避免在推理过程中的复杂计算, 得到的库所最终置信度更高, 推理过程更简单, 更有效、合理。

矩阵推理过程如下。

- 1) 根据故障元件的模型确定 N, I, O 。
- 2) 变迁从 $k = 1$ 开始依次触发, 其中 $k = 1, 2, \dots, N$; 确定库所初始置信度向量 α^{k-1} 。
- 3) 计算第 k 层各变迁的置信度 $R_l^{k-1} = \alpha^{k-1} I$, 然后将其与激发阈值进行比较 $R_c^{k-1} = R_l^{k-1} R_A$ 。计算第 k 层变迁触发后得到的库所终态向量 $\alpha^k = f(R_c^{k-1} \cdot O^T)$ 。
- 4) 若 $k \neq N$, 则令 $k = k + 1$, 并继续执行步骤 3); 否则, 计算结束。

2.4 保护和断路器的时间约束推理和时序检查

电力系统元件发生故障后, 根据调度中心收到的各告警信息获取时间点, 通过反向、正向时序推理对收到的告警信息进行时序检查, 对时序不一致的告警信息对应的库所进行置信度修正, 可以提高诊断的速度与准确度。 $T(v)$ 表示原因事件的时间点约束; t_{pi} 表示库所 p_i 对应的报警信号获取时间点, 其中 $i = 1, 2, \dots, n$; $D(t_v, t_{pi})$ 表示库所 p_i 对应的时间距离约束。

1) 反向时序推理

结合可疑故障元件的模糊 Petri 网模型, 利用 t_{pi} 和其对应的时间距离约束 $D(t_v, t_{pi})$ 进行反向时序推理得到原因事件的过渡时间点约束, 即:

$$T(v) = t_{pi} - D(t_v, t_{pi}) \quad (6)$$

推理得到的过渡时间点约束为 $T(v_1), T(v_2), \dots, T(v_s)$, 将有共同时间区间的过渡时间点约束进行合并,

得到原因事件的可能的多个时间点约束 $T(v)^1, T(v)^2, \dots, T(v)^h$ 。

2) 正向时序推理

将得到的原因事件的时间点约束分别进行正向时序推理, 得到各保护和断路器的初始库所的时间点约束, 即:

$$T(t_{pi}) = T(v)^h + D(t_v, t_{pi}) \quad (7)$$

将 t_{pi} 与 $T(t_{pi})$ 进行比较分析。若 $t_{pi} \in T(t_{pi})$, 则无需修正库所初始置信度。若 $t_{pi} \notin T(t_{pi})$, 则将对应的库所初始置信度进行修正, 设为 0.1。

3 时间约束的改进 HFPN 故障诊断过程

时间约束的改进 HFPN 故障诊断过程如下。

1) 根据调度中心收到的配电网报警信息, 通过结线分析法^[18]确定可疑故障元件, 并根据上文所述的双侧保护或单侧保护线路的建模方式建立故障元件的诊断模型。

2) 根据 t_{pi} 和 $D(t_v, t_{pi})$ 进行反向时序推理, 将有共同时间区间的时间点约束进行合并, 得到原因事件的时间点约束。然后通过正向时序推理得到 $T(t_{pi})$, 将 t_{pi} 与 $T(t_{pi})$ 进行比较分析, 修正初始库所置信度。

3) 对得到的库所初始置信度进行矩阵推理运算, 最终得到故障元件的置信度, 以及故障发生的时间点约束。

4) 故障置信度的阈值是判定元件故障与否的重要依据, 因此本文设置的故障置信度的阈值^[16]为 0.65。若可疑故障元件置信度大于 0.65, 说明该元件发生了故障, 否则认为无故障。

5) 根据文献[12]对继电保护装置的动作进行评价。

4 算例验证与比较

4.1 算例验证

以图 2 的线路 L_2 和 L_4 单重故障为例, 其中 L_2 为分布式电源上游的双侧保护, L_4 为下游的单侧保护, 对线路 L_2 和 L_4 分别建立改进的分层模糊 Petri 网模型。

1) 调度中心收到的告警信息为 $(L_{2Sm}, 0)$ 、 $(L_{2Rm}, 5)$ 、 $(CB_4, 35)$, 单位均为 ms。

利用结线分析法快速搜索故障区域, 得到可疑故障元件为 L_2 。首先进行反向时序推理, 得到 L_2 的过渡时间点约束为:

$$T(L_{2_1}) = t_{L_{2Sm}} - D(t_v, t_m) = [-40, -10] \quad (8)$$

$$T(L_{2_2}) = t_{L_{2Rm}} - D(t_v, t_m) = [-35, -5] \quad (9)$$

$$T(L_{2_3}) = t_{CB_{4m}} - D(t_v, t_m) - D(t_R, t_{CB}) = [-45, 5] \quad (10)$$

$$T(L_{2_4}) = t_{CB_{4p}} - D(t_v, t_p) - D(t_R, t_{CB}) = [-345, -245] \quad (11)$$

对过渡时间点约束求交集, 得到原因事件的时间点约束为:

$$T(v)^1 = [-35, -10] \quad (12)$$

然后利用原因事件的时间点约束进行正向时序推理, 得到各保护和断路器的初始库所的时间点约束为:

$$T(L_{2Sm}) = T(L_{2Rm}) = T(v)^1 + D(t_v, t_m) = [-25, 30] \quad (13)$$

$$T(CB_{4m}) = T(v)^1 + D(t_v, t_m) + D(t_R, t_{CB}) = [-5, 70] \quad (14)$$

$$T(CB_{4p}) = T(v)^1 + D(t_v, t_p) + D(t_R, t_{CB}) = [245, 370] \quad (15)$$

将收到的告警信息与其对应的时间点约束进行对比分析, L_{2Sm} 、 L_{2Rm} 、 CB_{4m} 满足其时间点约束, 故无需修正库所置信度; CB_{4p} 不满足其时间点约束, 故置信度修正为 0.1。

线路 L_2 有两层模型, 第一层为送端和受端模型。由 L_2 受端模型可知, 受端变迁层数 $N = 2$, 需要执行两次迭代计算, 输入矩阵 I 和输出矩阵 O 如下:

$$I = \begin{bmatrix} 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.2 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.5 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$O = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.95 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.425 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.425 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0.95 & 0.85 \end{bmatrix}$$

确定线路 L_2 送端库所初始置信度为:

$$\alpha^0 = [0.991\ 3, 0.983\ 3, 0.2, 0.1, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (16)$$

处于第1层变迁时,计算变迁的置信度得:

$$\mathbf{R}_l^0 = \alpha^0 \mathbf{I} = [0.988\ 1, 0.16, 0.1, 0.1, 0, 0, 0] \quad (17)$$

比较变迁的置信度和激发阈值得:

$$\mathbf{R}_c^0 = [0.988\ 1, 0.16, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (18)$$

$$\alpha^1 = f(\mathbf{R}_c^0 \cdot \mathbf{O}^T) =$$

$$[0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.999\ 6, 0.115\ 6, 0, 0, 0] \quad (19)$$

处于第2层变迁时,计算变迁的置信度得:

$$\mathbf{R}_l^1 = \alpha^1 \mathbf{I} = [0, 0, 0, 0, 0.999\ 6, 0.115\ 6, 0] \quad (20)$$

比较变迁的置信度和激发阈值得到:

$$\mathbf{R}_c^1 = [0, 0, 0, 0, 0.999\ 6, 0.115\ 6, 0] \quad (21)$$

$$\mathbf{R}_c^1 \cdot \mathbf{O}^T = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1.109\ 4] \quad (22)$$

$$\alpha^2 = f(\mathbf{R}_c^1 \cdot \mathbf{O}^T) = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.964\ 7] \quad (23)$$

则线路 L_2 受端的最终输出库所置信度为 0.964 7。同理可求出线路 L_2 送端的最终输出库所置信度为 0.997。

第2层模型为综合模型,分层变迁层数 $N = 1$, 只需执行一次迭代计算。综合模型输入、输出矩阵分别为:

$$\mathbf{I} = [0.5, 0.5, 0]^T, \mathbf{O} = [0, 0, 1]^T \quad (24)$$

综合模型的库所初始置信度为:

$$\alpha^0 = [0.964\ 7, 0.997, 0] \quad (25)$$

执行一次迭代计算后得到库所终态向量为:

$$\alpha^1 = [0, 0, 0.998\ 9] \quad (26)$$

则线路 L_2 发生故障的概率值为 0.998 9, 大于 0.65, 判断线路 L_2 发生了故障。最后在推理过程中对继电保护装置的动作进行判断,得到断路器 CB_3 为漏报。

2) 调度中心收到的告警信息为 $(L_{4_m}, 0)$ 、 $(CB_8, 38)$, 单位均为 ms。

利用结线分析法快速搜索故障区域,得到可疑故障元件为 L_4 。进行反向时序推理,得到 L_4 的过段时间点约束,合并重叠时间区间,得到原因事件的时间点约束为:

$$T(v)^1 = T(LA_1) \cap T(LA_2) = [-40, -10] \quad (27)$$

然后利用原因事件的时间点约束进行正向时序推理,得到各保护和断路器的初始库所的时间点约束为:

$$T(L_{4_m}) = T(v)^1 + D(t_v, t_m) = [-30, 30] \quad (28)$$

$$T(CB_{8_m}) = T(v)^1 + D(t_v, t_m) + D(t_R, t_{CB}) = [-10, 70] \quad (29)$$

$$T(CB_{8_p}) = T(v)^1 + D(t_v, t_p) + D(t_R, t_{CB}) = [240, 370] \quad (30)$$

将收到的告警信息与其时间点约束进行对比分析, L_{4_m} 、 CB_{8_m} 满足其时间点约束,故无需修正库所置信度。

CB_{8_p} 不满足其时间点约束,故置信度修正为 0.1。通过线路 L_4 的模型得到输入矩阵 \mathbf{I} 和输出矩阵 \mathbf{O} 。由线路 L_4 的模型可知,变迁层数 $N = 2$, 需要执行两次迭代计算。

确定线路 L_4 库所初始置信度为:

$$\alpha^0 = [0.991\ 3, 0.983\ 3, 0.2, 0.1, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (31)$$

处于第1层变迁时,计算变迁的置信度得:

$$\mathbf{R}_l^0 = \alpha^0 \mathbf{I} = [0.988\ 1, 0.16, 0.1, 0.1, 0, 0, 0] \quad (32)$$

比较变迁的置信度和激发阈值得到:

$$\mathbf{R}_c^0 = [0.988\ 1, 0.16, 0, 0, 0, 0, 0] \quad (33)$$

$$\mathbf{R}_c^0 \cdot \mathbf{O}^T = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.988\ 1, 0.152, 0, 0, 0] \quad (34)$$

$$\alpha^1 = f(\mathbf{R}_c^0 \cdot \mathbf{O}^T) = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.999\ 6, 0.115\ 6, 0, 0, 0] \quad (35)$$

处于第2层变迁时,计算变迁的置信度得到:

$$\mathbf{R}_l^1 = \alpha^1 \mathbf{I} = [0, 0, 0, 0, 0.999\ 6, 0.115\ 6, 0] \quad (36)$$

比较变迁的置信度和激发阈值得到:

$$\mathbf{R}_c^1 = [0, 0, 0, 0, 0.999\ 6, 0.115\ 6, 0] \quad (37)$$

$$\mathbf{R}_c^1 \cdot \mathbf{O}^T = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1.109\ 4] \quad (38)$$

$$\alpha^2 = f(\mathbf{R}_c^1 \cdot \mathbf{O}^T) = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.964\ 7] \quad (39)$$

则线路 L_4 发生故障的概率值为 0.964 7, 大于 0.65, 判断线路 L_4 发生了故障。

4.2 算例比较

利用图2所示的配电网系统结构图对本文所提方法进行多种故障场景测试,并且将其与文献[7,9]的诊断结果进行对比,如表2所示,告警信息的时间单位均为 ms。案例1为分布式电源上游的双侧保护,并且为单重故障诊断,因此都能准确的诊断出来。案例2为分布式电源下游单侧保护故障诊断,在保护和断路器拒动、漏报的情况下仍能诊断出故障元件。案例3为保护和断路器存在拒动的单重故障,文献[7,9]不能诊断出故障元件,但是利用本文的方法可以诊断出。案例4为多重复杂故障诊断,即使伴随断路器的拒动、误动,以及报警信息的漏报和时序不一致,本文所提方法仍能诊断出实际故障元件。

将本文结果与文献[16]进行比较,本文所提方法诊断故障元件与文献[16]的结果相同,但是对于真实故障元件的置信概率更高,非故障元件的置信概率更低,诊断效果更好。

通过上述分析可知,本文所提方法具有良好的容错性,不论是单侧保护或双侧保护,还是多重复杂故障的情况,本文所提方法均能得出正确的故障诊断结果。将本文方法与其他几种方法进行比较,结果如表3所示。

表 2 时间约束的改进 HPFN 方法的故障案例诊断结果

Table 2 Diagnostic results of fault cases based on improved HPFN method with time constraints

案例编号	收到的告警信息	可疑故障元件	文献[16]故障概率	本文故障诊断结果			实际故障元件	文献[7]	文献[9]
				故障概率	故障发生的时间点约束	保护与断路器的动作评价			
1	($L_{2Sm}, 10$)、($L_{2Rm}, 15$) ($DG_{Ls}, 970$)、($L_{3Rs}, 980$) ($CB_7, 1\ 000$)、($CB_6, 1\ 010$)	L_2	0.882	0.999	[-25, 0]	CB_4 拒动 CB_3 漏报	L_2	L_2	L_2
2	($L_{4m}, 15$)、($DG_{2s}, 976$) ($CB_5, 1\ 010$)、($CB_9, 1\ 012$)	L_4 DG_2	0.807 0.613	0.944 0.236	[-25, 5] [932, 982]	L_3 漏报 CB_8 拒动	L_4	L_4	L_4
3	($L_{2Sm}, 5$)、($L_{2Rp}, 300$) ($L_{1Ss}, 900$)、($CB_4, 332$)、 ($CB_1, 930$)	L_1 L_2	0.515 0.722	0.419 0.997	[850, 900] [-35, -5]	CB_3 拒动 L_{2Rm} 拒动	L_2	无	无
4	($L_{2Sm}, 10$)、($L_{2Rm}, 15$) ($L_{3Sm}, 70$)、($L_{3Rm}, 72$) ($L_{2Ss}, 1\ 028$) ($CB_3, 33$)、($CB_4, 40$) ($CB_6, 95$)、($CB_2, 280$) ($CB_7, 870$)	L_1 L_2 L_3 DG_1	0.515 0.897 0.874 0.613	0.446 0.979 0.974 0.132	[200, 250] [-25, 0] [32, 60] [790, 840]	CB_7 时标错误 CB_5 拒动 CB_2 误动 DG_1 漏报	L_2 L_3	L_2 L_3	L_2 L_3

表 3 本文方法与现有方法的对比

Table 3 Comparison between proposed method and existing methods

方法	是否考虑时序信息	是否考虑不确定性	适用范围	计算任务	拓扑结构变化时模型适应性	计算方法	性能
文献[6]	否	是	电网故障诊断	置信度的模糊推理	适应性差,网络拓扑结构变化时需要重新建模	矩阵运算	运算速度快,容错性一般
文献[19]	是	否	电网故障诊断	时序推理检查	未考虑拓扑结构变化时快速修正的问题	查表匹配	运算速度慢,容错性一般
文献[20]	否	是	配电网故障诊断	建立故障决策表	模型和故障决策表需要重新构建,调整难度大	矩阵运算	运算速度快,容错性一般
文献[21]	是	否	配电网故障诊断	计算故障元件集内所有故障元件的可信度	网络拓扑结构变化时无需重新建模	查表匹配	运算速度慢,容错性好
本文方法	是	是	配电网故障诊断	时序及置信度推理	只需增减相应的模型,改动较小	矩阵运算	运算速度快,容错性好

5 结 论

本文基于输电线路的故障诊断方法,将模糊 Petri 网的故障诊断方法进行改进应用到有源配电网中,提出一种时间约束的改进分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断方法。与输电线路不同的是,配电网线路中分布式电源上游是双侧保护,而下游是单侧保护,因此需要分别建立改进的分层模糊 Petri 网模型,分层建模的方法对配电网拓扑结构改变具有良好的适应性。本文所提方法充分利用调度中心收到的告警信息的时序特性,进行时序推理和时序检查,筛选大量错误时序,提高了故障诊断准确度,优化了模糊 Petri 网模型和矩阵推理流程,得到的故障元件置信度高,整个故障诊断过程简明清晰,运算速度快。通过配电网系统算例表明该方法在保护和断路器误动、拒动以及告警信息丢失的情况下均能得到正确的诊断结果,还能得到故障发生的时间点约束,具有较好的容

错性。

参考文献

[1] 熊国江,石东源,等.基于径向基函数神经网络的电网模糊元胞故障诊断[J].电力系统自动化,2014,38(5):59-65.
XIONG G J, SH D Y, et al. Fuzzy cellular fault diagnosis of power grid based on radial basis function neural network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5):59-65.

[2] 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.
ZHAO W, BAI X M, DING J, et al. Power grid fault diagnosis method based on collaborative expert system and multi-agent technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20):1-8.

- [3] 徐青山, 娄藕蝶, 郑爱霞, 等. 基于近邻传播聚类 and 遗传优化的非侵入式负荷分解方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3868-3878.
- XU Q SH, LOY O D, ZHENG AI X, et al. A non-intrusive load decomposition method based on affinity propagation and genetic algorithm optimization [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3868-3878.
- [4] 苏玉刚, 陈龙, 吴学颖, 等. 基于遗传算法的 SS 型磁耦合 WPT 系统负载与互感识别方法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(18): 4199-4206.
- SU Y G, CHEN L, WU X Y, et al. Load and mutual inductance identification method of SS-type magnetically-coupled WPT system based on genetic algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(18): 4199-4206.
- [5] LEFEBVRE D. On-line fault diagnosis with partially observed Petri nets [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2014, 59(7): 1919-1924.
- [6] XU L, KEZUNOVIC M. Implementing fuzzy reasoning Petri-nets for fault section estimation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 676-685.
- [7] 谢红涛, 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): 246-252.
- XIE H T, TONG X Y. A method of synthetical fault diagnosis for power system based on fuzzy hierarchical Petri net [J]. Power System Technology, 2012, 36(1): 246-252.
- [8] 杨健维, 何正友. 基于时序模糊 Petri 网的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(15): 46-51.
- YANG J W, HE ZH Y. Power system fault diagnosis approach based on time sequence fuzzy Petri net [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 46-51.
- [9] 童晓阳, 谢红涛, 孙明蔚. 计及时序信息检查的分层模糊 Petri 网电网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 63-68.
- TONG X Y, XIE H T, SUN M W. Power system fault diagnosis model based on layered fuzzy Petri net considering temporal constraint checking [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(6): 63-68.
- [10] 张岩, 张勇, 文福拴, 等. 容纳时序约束的改进模糊 Petri 网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 66-72.
- ZHANG Y, ZHANG Y, WEN F Q, et al. Power system fault diagnosis with an enhanced fuzzy Petri net accommodating temporal constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 66-72.
- [11] 徐彪, 尹项根, 汪旸, 等. 基于模糊时间 Petri 网的电网故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(2): 70-76.
- XU B, YING X G, WANG Y, et al. Fault diagnosis method of power system based on fuzzy time Petri net [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(2): 70-76.
- [12] 白展, 苗世洪, 孙雁斌, 等. 计及时间约束的改进模糊 Petri 网故障诊断模型[J]. 电工技术学报, 2016, 31(23): 107-115.
- BAI ZH, MIAO SH H, SUN Y B, et al. Fault diagnosis model based on improved fuzzy Petri net considering time constraints [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(23): 107-115.
- [13] 赖宏毅, 汪旸, 杨雯, 等. 基于事件起点的层次化时序 Petri 网及其电网故障诊断方法[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(2): 201-209.
- LAI H Y, WANG Y, YANG W, et al. Hierarchical temporal Petri net based on event-starting point and its fault diagnosis method of power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(2): 201-209.
- [14] 叶斌, 王祺, 代磊, 等. 适应分布式电源接入的配电网过流保护整定策略[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 74-80.
- YE B, WANG Q, DAI L, et al. Over-current protection setting strategy on distribution network adapting to distributed generators access [J]. Smart Power, 2018, 46(6): 74-80.
- [15] 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 J W, HE ZH Y, ZANG T L. Power system fault-diagnosis method based on directional weighted fuzzy Petri nets [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 42-49.
- [16] 杨斐然, 于永进. 基于时间约束的分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 99-106.
- YANG F R, YU Y J. Fault diagnosis of distribution network based on time constrained hierarchical fuzzy Petri nets [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 99-106.
- [17] 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.

ZHANG L. The fault diagnosis of electric power systems based on fuzzy Petri nets [D]. Nanchang: Nanchang University, 2007.

- [18] 陈靖秋.基于信息融合的电力系统不确定性故障诊断的研究[D].成都:西南交通大学,2014.

CHENG J Q. Study of fault diagnosis in uncertain power system on information fusion [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

- [19] 康泰峰,吴文传,张伯明.基于时间溯因推理的电网诊断报警方法[J].中国电机工程学报,2010,30(19):84-90.

KANG T F, WU W ZH, ZHANG B M. Temporal abductive reasoning based on diagnosis and alarm for power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 84-90.

- [20] 兰华,李晋,高奥,等.粗糙集结合 Petri 网进行分区域并行推理的配电网故障诊断方法[J].电测与仪表,2012,49(1):13-16,26.

LAN H, LI J, GAO A, et al. Fault diagnosis of distribution networks by the regional parallel reasoning based on rough set and Petri nets [J]. Electrical Measurement and Instrumentation, 2012, 49(1): 13-16, 26.

- [21] 刘鑫蕊,高艺伟,王智良.基于改进时间模糊 Petri 网配电网故障诊断方法[J].东北大学学报(自然科学版),2016,37(11):1526-1529.

LIU X R, GAO Y W, WANG ZH L. Method of power distribution network fault diagnosis based on improved time fuzzy Petri net [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37(11): 1526-1529.

作者简介



袁川来, 1995 年于湖南农业大学获得学士学位,现为湖南工业大学教授,澳大利亚科廷大学客座教授,主要研究方向为工业机器人传感技术、复杂机电系统故障诊断与优化控制等。

E-mail:chuanlai1972@163.com

Yuan Chuanlai received his B. Sc. degree from Hunan Agricultural University in 1995. Now he is a professor at Hunan University of Technology and a visiting fellow of Curtin University in Australia. His main research interests include sensor technology of industrial robots, fault diagnosis and optimal control of complex mechanical and electrical systems, etc.



廖庸邑, 2014 年于湖南工业大学获得学士学位,现为湖南工业大学硕士研究生,主要研究方向为智能电网的故障诊断。

E-mail:lyy520pxw@163.com

Liao Yongyi received his B. Sc. degree from Hunan University of Technology in 2014. He is now a M.Sc. candidate at Hunan University of Technology. His main research interest is fault diagnosis of smart grid.



孔玲爽(通信作者),分别在 2005 年和 2010 年于中南大学获得硕士学位和博士学位,现为湖南工业大学教授,主要从事复杂工业过程建模与优化控制方面的研究。

E-mail:konglingsh@126.com

Kong Lingshuang (Corresponding author) received M.Sc. and Ph.D. both from Central South University in 2005 and 2010, respectively. Now she is a professor at Hunan University of Technology. Her main research interests include modeling and optimization control of complex industrial processes.



刘建华,分别在 2009 年和 2013 年于中南大学获得硕士学位和博士学位,现为湖南工业大学副教授,主要研究方向为电力牵引、传动与控制理论及应用等。

E-mail:jhliu0615@163.com

Liu Jianhua received M.Sc. and Ph.D. both from Central South University of Forestry and Technology in 2009 and 2013, respectively. Now he is an associate professor at Hunan University of Technology. His main research interests include theory of electric traction, transmission and control.