

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190200

基于时间约束的分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断

杨斐然, 于永进

(山东科技大学, 山东 青岛 266590)

摘要: 配电网发生故障后充分利用报警信息和时序信息快速准确地诊断出故障元件, 是对配电网可靠供电和保证配电网安全运行的首要任务。在现有 Petri 网的故障诊断基础上, 提出一种基于时间约束的分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断模型。建立的模型对配电网的拓扑结构变化具有良好的适应性, 通过使用主保护和主保护对应断路器的动作时间来获得原因事件动作起点, 并对高斯函数进行修正。通过算例比较证明此方法具有较强的准确性和通用性, 能有效地诊断出配电网的故障。

关键词: 故障诊断; 原因事件; 分层模糊 Petri 网; 配电网

Fault diagnosis of distribution network based on time constrained hierarchical fuzzy Petri nets

YANG Feiran, YU Yongjin

(Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

Abstract: It is the primary task for the reliable power supply and safe operation of the distribution network to make full use of the alarm information and time series information to quickly and accurately diagnose the faulty component after the fault of the distribution network. Based on the fault diagnosis of existing Petri nets, a fault diagnosis model for distribution network based on time-constrained hierarchical fuzzy Petri nets is proposed. The model established in this paper has good adaptability to the topology change of distribution network, and the starting point of the event action of reason is obtained by using the main protection and main protection corresponding to the action time of the circuit breaker, and the Gaussian function is corrected. The comparison of the example shows that the method has strong accuracy and versatility, and can effectively diagnose the fault of the distribution network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61803233).

Key words: fault diagnosis; cause event; hierarchical fuzzy Petri net; distribution network

0 引言

可靠的故障诊断是配电网^[1-2]安全运行的首要条件, 为此故障元件的迅速判别有着至关重要的作用。目前, 电力系统的故障诊断在国内外有着广泛的研究, 如专家系统^[3]、人工神经网络^[4-7]、Petri 网^[8-11]、遗传算法^[12-14]等。上述方法均存在一定的限制, 如: ①专家系统维护困难, 推理速度较慢; ②人工神经网络需要供其学习的样本库; ③遗传算法的故障诊断时间较长, 且迭代较多; ④Petri 网推理简洁明了, 且其物理意义清晰。近年来模糊 Petri 网弥补了 Petri 网在故障诊断中的不足, 文献^[15]提出新的故障分析方法, 使用模糊 Petri 网能有效地对

故障进行诊断分析。文献^[16]使用的是断路器的时序属性和纠错算法, 提高了诊断速度和精度。文献^[17]研究了分层模糊 Petri 网的建模, 通过分层的方式降低了 Petri 网的规模, 提高了诊断速度。

上述的 Petri 网的诊断模型虽然有一定的容错性和适应性, 但是还没有发挥报警信号中时间约束在诊断中的关键作用和配电网的通用性。还存在以下的局限性: ①对时序信息的利用主要是用来筛选报警信号; ②未将其应用在有源配电网中。

不含分布式电源配电网的故障诊断, 一般都是单侧保护, 但接入分布式电源后的配电网发生故障, 则故障电流方向将发生改变, 传统故障诊断方法不再适用。为此本文提出将输电线路中 Petri 网的诊断方法使用到有源配电网中, 来解决传统故障诊断方法不再适用的问题。

本文在上述的基础上,分析分布式电源接入后对传统配电网模型和诊断方法的改变,并考虑主保护和相应断路器动作的约束关系,充分使用报警信号之间的时间约束来推理原因事件动作区间,通过时间约束对保护和断路器的拒动、误动和报警信号的丢失进行筛选,提高了对故障信息的辨识性和容错性。利用分层模糊 Petri 网建立模型,考虑配电网结构的网络拓扑变化,且提高了模型的适应性。通过三组算例比较验证了该模型的有效性。

1 时间约束的分层模糊 Petri 网模型

1.1 时间约束的分层模糊 Petri 网的基本定义

在传统 Petri 网^[15]基础上,充分利用报警信息的时间约束特性,定义一个 9 元组:

$$S = (P, T, I, O, T_\lambda, T_0, T_w, P_c, L)$$

式中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, P 为库所节点的集合, n 为库所的数量; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$, T 为变迁节点的集合, m 为变迁的数量。

$I: P \rightarrow T$, I 为各库所到相应变迁的输入弧矩阵 ($n \times m$), $I = [i_{ij}]$, $i_{ij} \in [0, 1]$ 。当存在库所 p_i 到变迁 t_j 的有向弧时,为有向弧的权值,不同的类型赋予不同的权值。

$O: T \rightarrow P$, O 为各变迁到相应库所的输出弧矩阵 ($m \times n$), $O = [o_{ij}]$, $o_{ij} \in [0, 1]$ 。当存在变迁 t_j 到库所 p_i 的有向弧时, o_{ij} 为有向弧的权值,不同的类型赋予不同的权值。

T_λ 为各变迁的阈值向量,将变迁 t_j 阈值设定为 0.2。

$T_0 = \{T_{01}, T_{02}, \dots, T_{0l}\}$ 为初始库所获得的时间 (l 维),为接收报警信号的实际时间。

$T_w = (T_{w1}, T_{w2}, \dots, T_{wl})$ 为由原因事件推理出和 T_0 对应的时间区间 (l 维)。

$P_c = \{P_1, P_2, \dots, P_c\}$ 对矩阵运算获得的不同库所置信度, P_1 为初始库所置信度, P_2 为第一次进行矩阵运算获得的库所置信度, P_c 为最后一次矩阵运算获得的库所置信度。

L 为子网所在的层数,送端和受端以及综合诊断。

1.2 时间约束定义

文献[18-19]提出了时间点和时间区间的相关概念。时间点可以分为确定时间点和不确定时间点,不确定时间点中 T 为一个变量。设定时间点区间 $T \in [T^-, T^+]$, T^- 和 T^+ 分别为 T 的起始点和终点,若 $T^- = T^+$,则 T 为确定的时间点。时间距离则是两

个时间点的时间长度^[18-19],用 $d(T_i, T_j)$ 表示 T_i 和 T_j 之间的时间距离, $d(T_i, T_j) = T_j - T_i$ 。用 $D(T_i, T_j) = [\Delta T_{ij}^-, \Delta T_{ij}^+]$ 来表示时间距离 $d(T_i, T_j)$ 的时间约束。

ΔT_{ij}^- 和 ΔT_{ij}^+ 分别为 $D(T_i, T_j)$ 起始点和终点。

配电网故障后调度中心获得报警信号,报警信号包括主保护、后备保护和断路器信息及其发生的时间等。通过获得的报警信号来进行时序推理诊断出配电网的实际故障元件,用时间距离约束来筛选大量的报警信息,对时序不一致的信息进行修正。为此根据文献[20-22]对保护动作和断路器设定延时区间,对应主保护、断路器、近后备保护和远后备保护设定的时间距离约束为

$$D(T_v, T_m) \in [\Delta T_{vm}^-, \Delta T_{vm}^+] = [10, 40] \text{ ms} \quad (1)$$

$$D(T_v, T_p) \in [\Delta T_{vp}^-, \Delta T_{vp}^+] = [260, 340] \text{ ms} \quad (2)$$

$$D(T_v, T_s) \in [\Delta T_{vs}^-, \Delta T_{vs}^+] = [950, 1070] \text{ ms} \quad (3)$$

$$D(T_R, T_{CB}) \in [\Delta T_{RCB}^-, \Delta T_{RCB}^+] = [20, 40] \text{ ms} \quad (4)$$

式中: v 表示原因事件; m 表示主保护; p 表示近后备保护; s 表示远后备保护; $D(T_R, T_{CB})$ 表示各保护对应断路器的时间距离约束; R 为各种保护; CB 表示断路器; v 为通过后文 2.2 节方法获得的原因事件起点。

1.3 传统配电网加入分布式电源对保护的影响

如图 1 所示为传统配电网配有单侧保护并加入分布式电源^[23]。当分布式电源上游发生故障 f_1 时,主电源和分布式电源提供不同方向的故障电流。若只断开 CB_1 ,则分布式电源还会对故障点提供短路电流。为此需要在分布式电源接入点的上游每条线路的远电源侧配置需要保护和断路器^[24-25],则分布式电源下游出现故障 f_2 ,故障点电流均为主电源和分布式电源同时提供同方向的故障电流,对单侧保护无影响。因此分布式电源下游还是使用单侧保护的方法。分布式电源下游线路 L_2 与分布式电源支路相连,若故障则远后备保护需要断开 CB_1 和 CB_3 ,而线路 L_3 若故障,短路电流由主电源和分布式电源均从线路 L_2 流入,因此其远后备保护只需断开 CB_4 。

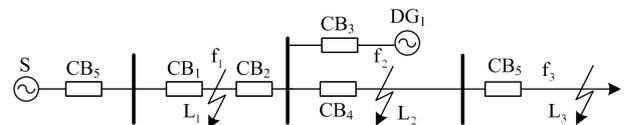


图 1 传统配电网系统结构图

Fig. 1 Structural diagram of traditional distribution network system

1.4 时间约束的分层模糊 Petri 网建模

以图 2 所示的简单配电网^[26]为例, 因有多个分布式电源, 则在分布式电源的上游远电源侧增加保护和断路器。增加断路器后, 传统配电网在接入分布式电源的上游部分由单侧保护变成两侧保护, 对改动后的模型构建基于时间约束的分层模糊 Petri 网模型。

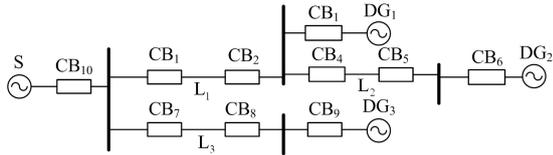


图 2 配电网系统结构图

Fig. 2 Distribution network system structure

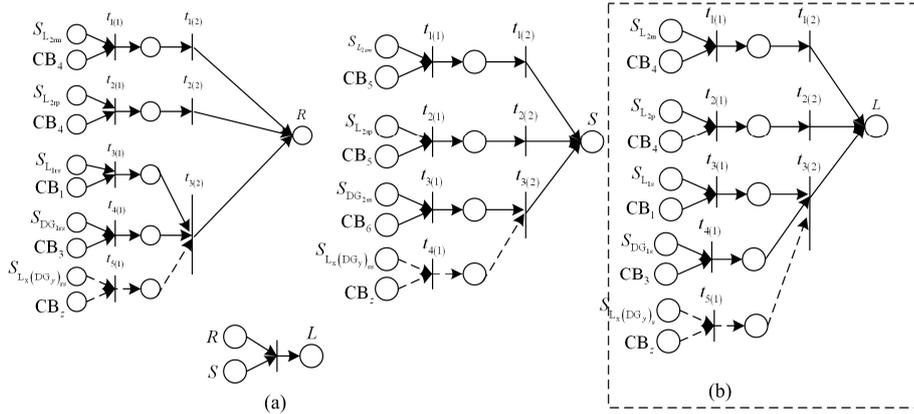


图 3 L_2 分层模糊 Petri 网

Fig. 3 L_2 hierarchical fuzzy Petri net

图 3(a)中: 下标 r,s 表示图 2 中线路 L_2 的受端和送端; S 表示保护; CB 表示断路器; m 、 p 、 s 分别表示主保护、近后备保护和远后备保护。例如 $S_{L_{2m}}$ 表示 L_2 线路的受端主保护; $S_{L_{2p}}$ 表示 L_2 线路的受端近后备保护; $S_{L_{1s}}$ 表示 L_1 线路的受端远后备保护。a) 左侧为线路受端模型, 包含各保护和相应的断路器。b) 同理右侧为线路送端的模型。c) 下侧为受端和送端模型的综合诊断模型。

图 3(b)为图 1 中的 L_2 发生故障的 Petri 网模型, 分布式电源下游为单侧保护, 因此不分受端和送端。最终库所的置信度为 L_2 的故障置信度。 S 表示保护; CB 表示断路器; m 、 p 、 s 分别表示主保护、近后备保护和远后备保护。若为图 1 中的 L_3 发生故障, 则需去除(2)中相应的模型 $S_{DG_{1s}}$ 和 CB_3 。

2 时间约束的分层模糊 Petri 网的推理过程

2.1 参数设置

1) 对库所和变迁的输入输出弧的权值设定如下:

当复杂配电网的网络拓扑结构变化时, Petri 网的关联矩阵过于繁杂且模型改动较大, 甚至有可能对配电网重新进行建模, 为此选用分层建模的方法。本文在建立配电网模型的时候考虑如下: 每条线路都配备了主保护、近后备保护、远后备保护和断路器。对 L_2 构建分层模糊 Petri 网模型如图 3 所示。若为分布式电源下游侧, 则只使用单侧保护, 如图 1 所示, 若 L_2 发生故障, 远后备保护对应断路器为 CB_1 和 CB_3 , 其 Petri 网模型不分受端和送端。

当配电网拓扑结构发生变化时, 若是元件的个数增减, 只需要增加或去除相应的模型, 例如增加元件只需在虚线部分加入相应的改变, 不会对整体的建模造成影响, 因此对网络拓扑结构有良好的适应性。

目前相关文献中的输入弧权值大多是根据经验自己设定的^[27], 为此将输入库所的输入弧权值设定为 0.54 和 0.46, 中间库所不具备物理意义, 为此都设置为 1。根据文献[17], 为了区别各保护和对应断路器对故障诊断的不同影响, 对主保护、近后备保护、远后备保护的变迁输出弧设定为 1、0.95、0.85。

2) 对库所初始置信度的设定

当配电网故障后线路配置的保护和断路器可能存在误动和拒动, 而上传到调度中心的报警信息可能存在丢失和畸变等影响。为此需要对各保护和对应断路器进行初始置信度设定^[20]。线路主保护和对应断路器置信度分别为 0.991 3、0.983 3; 近后备保护和对应断路器置信度分别为 0.8、0.85; 远后备保护和对应断路器置信度分别为 0.7、0.75。对未动作的保护和对应断路器的初始置信度, 赋予一个相对较低的置信度, 均设置为 0.2。

2.2 时间约束推理和时序检查

当电力系统元件故障的时候, 调度中心收到的报警信息反映出初始库所和相关时间, 充分使用调

度中心收到的报警信号来进行时序推理和筛选错误时序,能显著提高诊断的准确性与速度。应按照主保护、主保护相应的断路器、近后备保护、近后备保护相应的断路器、远后备保护、远后备保护对应的断路器的顺序来进行原因事件动作时间的推理。

因为调度中心只能收到报警信息,对于造成故障的原因事件的动作时间是未知的。为此选择主保护和主保护相应的断路器的时间约束合并,来推理出事件的起始动作区间。通过获得的事件起始动作区间来正向推理并筛选不合理的时间点。

1) 逆向时序推理

结合 1.3 节模型,利用获得的报警信号获取的时间 T_{0m} 、 T_{0mCB} 和 1.2 节的主保护和主保护对应断路器的时间距离约束 $D(T_v, T_m)$ 和 $D(T_r, T_{CB})$ 来进行逆向时序推理,通过逆向时推理来获得事件的起始动作区间。 T_{vm} 和 T_{vmCB} 分别为通过主保护和主保护对应断路器推理出的原因事件动作时间,若都无则取下一级。即:

$$T_{vm} = T_{0m} - D(T_{vm}, T_m)$$

$$T_{vmCB} = T_{0mCB} - D(T_m, T_{CB}) - D(T_{vm}, T_m)$$

对推理出的 T_{vm} 、 T_{vmCB} 时间区间求交集,取共同的重叠时间区间为原因事件动作时间。即:

$$T_v = T_{vm1} \cap T_{vm2} \cap \dots \cap T_{vmq} \cap T_{vmCB1} \cap T_{vmCB2} \cap \dots \cap T_{vmCBw} \quad (5)$$

若交集为空则没有共同的重叠时间区间,说明有报警信号发生畸变。则将不符合的时间区间剔除并且判定它为报警信号畸变。将剩下的时间区间求出的重叠时间区间设定为原因事件动作起点时间。

2) 正向时序推理

将获得的原因事件动作区间 T_v 进行正向的时序推理,得到保护与断路器的起始库所的时间区间,即:

$$T_m = T_v + D(T_v, T_m) \quad (6)$$

$$T_{mCB} = T_v + D(T_v, T_m) + D(T_m, T_{CB}) \quad (7)$$

$$T_p = T_v + D(T_v, T_p) \quad (8)$$

$$T_{pCB} = T_v + D(T_v, T_p) + D(T_p, T_{CB}) \quad (9)$$

$$T_s = T_v + D(T_v, T_s) \quad (10)$$

$$T_{sCB} = T_v + D(T_v, T_s) + D(T_s, T_{CB}) \quad (11)$$

经过正向时序推理得到各起始库所的时间区间,通过使用各元件动作的时间点和初始库所的时间区间进行比较分析,使用 2.4 节设定的算子计算。即:

$$U = T_0(?)T_w \quad (12)$$

若报警信号获得的时间点不符合初始库所时间区

间,则将对应的初始库所置信度设置为 0.1。如果报警信号没有初始库所的时间点,则为未动作。

2.3 高斯函数的修正

文献[15]和文献[17]的变迁输出概率为高斯函数 $G = e^{-\alpha(x-1)^2}$, 其中 $\alpha = 1.5$ 和 $\alpha = 3$ 。如表 1 所示: $\alpha = 1.5$ 时输出一一直大于输入,因此不利于故障的诊断分析;而 $\alpha = 3$ 时,当 $x < 0.5$ 时输出概率过于小了, $x \geq 0.5$ 时对输出概率不如 $\alpha = 2.8$ 时得到的输出概率大。因此选择适当的 $\alpha = 2.8$ 作为变迁输出置信的高斯函数。 $x < 0.5$ 时能得到较低的输出置信度,对错误信息有一定的抑制作用; $x \geq 0.5$ 时能得到较高的输出置信度,增强对故障的判断。

表 1 输入概率下的函数值与高斯函数取值的关系

Table 1 Relationship between the function value under input probability and the value of Gaussian function

α	输入概率下的函数值						
	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9
1	0.613	0.698	0.779	0.852	0.914	0.961	0.990
1.5	0.480	0.458	0.687	0.787	0.874	0.942	0.985
2	0.375	0.487	0.607	0.726	0.835	0.923	0.980
2.5	0.294	0.407	0.535	0.670	0.799	0.905	0.975
2.6	0.280	0.392	0.522	0.660	0.791	0.901	0.974
2.7	0.266	0.378	0.509	0.649	0.784	0.898	0.973
2.8	0.254	0.365	0.497	0.639	0.777	0.894	0.972
2.9	0.241	0.352	0.484	0.629	0.770	0.890	0.971
3	0.230	0.340	0.472	0.619	0.763	0.887	0.970

2.4 矩阵运算

为了方便矩阵推理,首先设定矩阵运算算子如下。

1) $C = A \hat{\times} B$, A 为 $1 \times n$ 阶矩阵, B 为 $n \times m$ 阶矩阵, C 为 $1 \times m$ 阶 $n \times m$ 矩阵, 则

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^n (A_{ij} B_{kj}) \quad (13)$$

2) $C = (A ? B)$, A 为 $1 \times n$ 阶矩阵, B 为常数, C 为 $1 \times n$ 阶矩阵, 则

$$C_{ij} = \begin{cases} A_{ij}, A_{ij} > B \\ 0.1, B > A_{ij} \end{cases} \quad (14)$$

3) $C = Y(A)$, A 为 $1 \times n$ 阶矩阵, C 为 $1 \times n$ 阶矩阵, $A_{ij} = 0$ 则 $C = 0$, 则

$$C_{ij} = e^{-2.8(A_{ij}-1)^2} \quad (15)$$

4) $U = A(?)B$, A 为时间点, B 为时间区间, U 为 n 个, 则

$$U_n = \begin{cases} 1, A_n \in B_n \\ 0.1, A_n \notin B_n \text{ 且 } A_n \neq \emptyset \end{cases} \quad (16)$$

2.5 推理过程

基于上述分析, 故障诊断过程可以分为 5 个步骤:

1) 根据调度中心收到的配电网报警信息, 通过结线分析法^[28-29]快速搜索故障区域, 选择可疑的故障元件, 并根据上文所述的分布式电源上游的双侧保护或下游的单侧保护的线路建模方式建立故障元件的诊断模型。

2) 用可疑故障元件相关的报警信号通过逆向和正向推理来对报警信号中的保护和断路器动作时间进行检查和筛选。

3) 通过推理后得到的库所初始置信度矩阵进行计算。最终得到故障元件的置信度。

4) 本文设置故障概率为 0.65, 若可疑故障元件置信度大于 0.65 时则判断其为实际故障元件, 若小于 0.65 则判断其为非故障元件。

5) 根据文献[22]对继电保护装置的動作进行判断。

3 算例验证与比较

3.1 算例验证

以图 4 的 L_2 和 L_4 单重故障为例, 其中 L_2 为分布式电源的上游双侧保护故障诊断, L_4 为下游与分布式电源直接相连支路的单侧保护故障诊断。

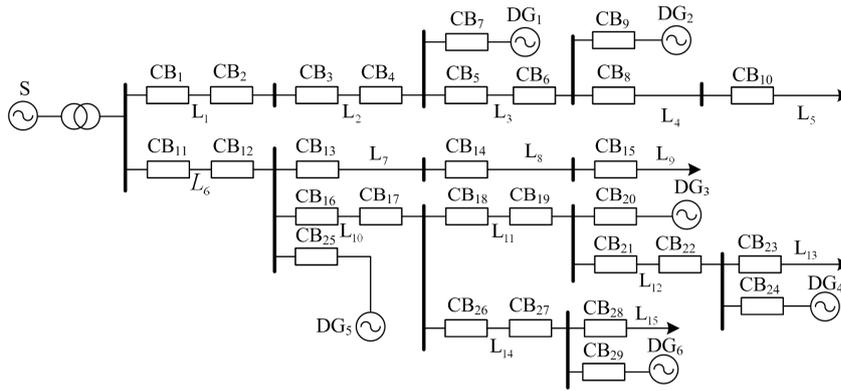


图 4 含分布式电源的配电网结构

Fig. 4 Distribution network structure with distributed power supply

① 调度中心收到报警信息 ($L_{2sm}, 0$ ms), ($L_{2sm}, 5$ ms), ($CB_4, 35$ ms)。

可疑故障元件为 L_2 , 则求取原因事件动作起点:

$$T_v = T_{vL_{2sm}} \cap T_{vL_{2sm}} \cap T_{vCB_4} = [-25, 0] \neq \emptyset$$

判断收到信息的时间约束关系:

$$U_1 = T_{L_{2sm}} (?) T_{0L_{2sm}} = 1$$

$$U_2 = T_{L_{2sm}} (?) T_{0L_{2sm}} = 1$$

$$U_3 = T_{CB_4} (?) T_{0CB_4} = 1$$

U 均为 1, 则都符合原因动作起点的时间约束。对 L_2 受端的 Petri 网模型进行初始化设置。初始库所置信度为

$$P_1 = [0.9913, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.0, 0.0, 0.0]$$

进行第一次矩阵运算:

$$Z_1 = P_1 \hat{\times} I = [0.627, 0.2, 0.2, 0.2, 0.0, 0.0]$$

$$B_1 = (Z_1 ? T_\lambda) = [0.627, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]$$

$$G_1 = Y(B) = [0.677, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0]$$

$$P_2 = G_1 \hat{\times} O = [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.677, 0.0, 0.0, 0.0]$$

进行第二次矩阵运算求出最终输出库所的置

信度:

$$Z_2 = P_2 \hat{\times} I = [0.0, 0.0, 0.0, 0.677, 0.0]$$

$$B_2 = (Z_2 ? T_\lambda) = [0.0, 0.0, 0.0, 0.677, 0.0]$$

$$G_2 = Y(B_2) = [0.0, 0.0, 0.0, 0.747, 0.0]$$

$$P_2 = G_1 \hat{\times} O = [0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.0, 0.747]$$

则 L_2 受端的最终输出库所置信度为 0.747。和上面所求 L_2 受端置信度的步骤类似, 求出 L_2 送端的最终库所置信度为 0.999。则 L_2 的置信度为 $0.873 > 0.65$, 判断 L_2 为故障元件。最后在推理过程中对继电保护装置的動作判断 CB_3 为漏报。

② 调度中心收到报警信息 ($L_{4m}, 0$ ms), ($CB_8, 38$ ms)。

可疑故障元件为 L_4 , 求取原因事件动作起点:

$$T_v = T_{vL_{4m}} \cap T_{vCB_8} = [-40, -10] \neq \emptyset$$

判断收到信息的时间约束关系:

$$U_1 = T_{L_{4m}} (?) T_{0L_{4m}} = 1$$

$$U_3 = T_{CB_8} (?) T_{0CB_8} = 1$$

U 均为 1, 则都符合原因动作起点的时间约束。

对 L_4 的 Petri 网进行初始化。初始库所置信度为 $P_1 = [0.9913, 0.9833, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0, 0, 0, 0, 0]$ 进行第一次矩阵运算:

$$Z_1 = P_1 \hat{\times} I = [0.9876, 0.2, 0.2, 0.2, 0, 0, 0]$$

$$B_1 = (Z_1 ? T_{\lambda}) = [0.9876, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

$$G_1 = Y(B) = [0.9996, 0, 0, 0, 0, 0, 0]$$

$$P_2 = G_1 \hat{\times} O = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0.9996, 0, 0, 0, 0]$$

进行第二次矩阵运算求出最终输出库所的置信度:

$$Z_2 = P_2 \hat{\times} I = [0, 0, 0, 0, 0.9996, 0, 0]$$

$$B_2 = (Z_2 ? T_{\lambda}) = [0, 0, 0, 0, 0.9996, 0, 0]$$

$$G_2 = Y(B_2) = [0, 0, 0, 0, 1, 0, 0]$$

$$P_2 = G_1 \hat{\times} O = [0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1]$$

则 L_4 的最终输出库所置信度为 $1 > 0.65$, 判断 L_4 为故障元件。

3.2 算例比较

本文基于输电线路故障诊断方法, 将 Petri 网故

障诊断方法改进应用在有源配电网中, 表 2 中的案例 1 到案例 4 为本文和文献[17]、文献[20]的故障诊断对比, 其中有分布式电源上游双侧保护和下游单侧保护案例。案例 1 和案例 3、4 为双侧保护, 案例 2 为单侧保护, 报警信号时间均为毫秒。鉴于篇幅所限制, 基于时间约束的分层模糊 Petri 网模型的建立和诊断过程不详细给出。案例 1 为简单的单重故障, 因此都可以准确地识别出来; 案例 2 为分布式电源下游单侧保护故障诊断, 在拒动和漏报的情况也能诊断出故障元件; 案例 3 为保护和断路器均存在拒动的单重故障, 但文献[17]、文献[20]并不能判断出线路发生故障; 案例 4 为多重复杂故障, 而本文方法均可识别出故障与复杂状况。如表 2 所示的诊断结果对比可以发现, 本文提出的方法充分利用了报警信息的时间约束关系, 正确的选择原因动作时间点。不论是双侧保护或单侧保护均能准确诊断故障。且在保护和断路器存在拒动、误动和报警信息缺失等复杂的情况时, 都具有良好的容错性, 并能准确地判断出复杂情况中存在地故障元件。

表 2 本文和其他现有方法比较

Table 2 Comparison of the method proposed by this article with other existing methods

模型	案例	报警信号	本文诊断				实际故障元件	文献 [17]	文献 [20]
			可疑故障	故障置信度	故障原因时间约束	保护与断路器的动作			
1	1	$(L_{2rm}, 15), (L_{2sm}, 10)$ $(L_{2rp}, 270), (L_{1rs}, 980)$ $(DG_{1s}, 970), (CB_5, 41)$ $(CB_1, 1010), (CB_3, 1000)$	L_2	0.882	$[-25, 0]$	CB_4 拒动	L_2	L_2	L_2
2	2	$(L_{4m}, 15), (L_{4p}, 273)$ $(DG_{2s}, 976), (CB_9, 1012)$ $(CB_5, 1010)$	L_4 L_3 DG_2	0.806 7 0.306 7 0.613 1	$[-25, 5]$ $[930, 980]$ $[932, 982]$	L_{3s} 漏报 CB_8 拒动	L_4	L_4	L_4
2	3	$(L_{2sm}, 5), (L_{2sp}, 300)$ $(L_{1rs}, 900), (CB_1, 930)$	L_1 L_2	0.305 0.722	$[850, 900]$ $[-35, -5]$	CB_4 拒动 L_{2rm} 拒动	L_2	无	无
2	4	$(L_{2rm}, 10), (L_{2sm}, 15)$ $(L_{3m}, 70), (L_{3sm}, 72)$ $(L_{2rs}, 1028), (DG_{1s}, 1030)$ $(CB_2, 280), (CB_3, 33)$ $(CB_4, 40), (CB_6, 95)$ $(CB_7, 1050)$	L_1 L_2 L_3 DG_1	0.305 0.999 0.874 0.613	$[200, 250]$ $[-25, 3]$ $[32, 60]$ $[970, 1020]$	L_{3rp} 漏报 CB_5 拒动 CB_2 误动 DG_{1s} 丢失	L_2, L_3	L_2 L_3 DG_1	L_2 L_3

4 结论

本文提出一种基于时间约束的分层模糊 Petri 网配电网故障诊断方法, 本文的诊断方法基于输电线路中的故障诊断方法改进并应用于有源配电网中。与输电线路中不同的是配电网线路中分布式电源上游侧是两侧保护, 而下游则是单侧保护。通过分层模糊的建模方式对配电网网络拓扑改变具有较

好的适应性。使用合并主保护和主保护对应断路器的时间约束的方法, 来推断原因事件的起始动作时间。通过正向和逆向时序推理对各保护和对应断路器的动作时间点进行筛选与置信度修正, 更准确地获得元件动作信息。对变迁输出概率求取函数进行改进, 增强对故障的诊断的可靠性。通过三组配电网模型算例验证与对比, 证明该方法能有效地对配

电网的故障进行故障诊断,并准确地判断故障元件。该方法运算过程简单清晰,充分利用报警信息的时序信息与时间约束,诊断速度快,具有良好的应用前景。

参考文献

- [1] HUANG J, GE S, HAN J, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 63-70. DOI: 10.1186/s41601-016-0020-2.
- [2] 梁睿, 孟祥震, 周鲁天, 等. 配电网故障定位技术发展现状及展望[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 20-27.
LIANG Rui, MENG Xiangzhen, ZHOU Lutian, et al. Status quo and prospect of distribution network fault location[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 20-27.
- [3] KIRSCHEN D, WOLLENBERG B. Intelligent alarm processing in power systems[J]. Proceedings of the IEEE, 2002, 80(5): 663-672.
- [4] 杜江, 张知杰, 孙铭阳, 等. 深广神经网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2019, 40(1): 90-96.
DU Jiang, ZHANG Zhijie, SUN Mingyang, et al. Deep & wide model and its application in transformer fault diagnosis[J]. Journal of North University of China (Natural Science Edition), 2019, 40(1): 90-96.
- [5] 孙波, 黄建波, 陆洁, 等. 基于小波 SOM 神经网络和多 Agent 系统的微电网故障诊断方法[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(8): 151-155, 186.
SUN Bo, HUANG Jianbo, LU Jie, et al. Micro grid fault diagnosis method based on wavelet SOM neural network and multi-agent system[J]. Ship Electronic Engineering, 2018, 38(8): 151-155, 186.
- [6] 朱祥兵, 李垣江, 王建华. 基于二进制莱维风驱动算法的船舶岸电系统并网故障诊断方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(16): 89-96.
ZHU Xiangbing, LI Yuanjiang, WANG Jianhua. Fault diagnosis system about grid connection of shore power based on the improved binary levy wind driven algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(16): 89-96.
- [7] 程学珍, 朱晓林, 杜彦宾, 等. 基于神经模糊 Petri 网的高压断路器故障诊断研究[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2535-2544.
CHENG Xuezhen, ZHU Xiaolin, DU Yanbin, et al. High voltage circuit breaker fault diagnosis based on neural fuzzy Petri nets[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2535-2544.
- [8] 吉兴全, 梁瑜娜, 于永进, 等. 基于冗余嵌入 Petri 网的电网故障诊断方法[J]. 安徽大学学报(自然科学版), 2016, 40(5): 50-56.
JI Xingquan, LIANG Yuna, YU Yongjin, et al. An approach of fault diagnosis for power network based on redundant embedded Petri net[J]. Journal of Anhui university (Natural Science Edition), 2016, 40(5): 50-56.
- [9] 仇大伟. 基于改进 Petri 网算法的电网故障诊断研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2017.
QIU Dawei. Research on power grid fault diagnosis based on improved Petri net algorithm[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2017.
- [10] 杨雯, 刘元琦, 吴小忠, 等. 计及死区故障的 3/2 接线变电站的 Petri 网故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 28-37.
YANG Wen, LIU Yuanqi, WU Xiaozhong, et al. A fault diagnosis method of 3/2 connection substation based on Petri nets with dead-zone fault taken into account[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 28-37.
- [11] 孙月琴, 胡晓飞, 王海港, 等. 基于 Petri 网理论的智能签票系统防误算法的设计与实现[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 110-115.
SUN Yueqin, HU Xiaofei, WANG Haigang, et al. Design and implementation of protection scheme intelligent anti-misoperation algorithm based on Petri net theory[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 110-115.
- [12] 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 Qingshan, LOU Oudie, ZHENG Aixia, 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.
- [13] 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 Yugang, CHEN Long, WU Xueying, 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.
- [14] 朱小会, 齐仁龙. 基于遗传算法的船舶电网故障诊断优化方法[J]. 舰船科学技术, 2016, 38(12): 88-90.
ZHU Xiaohui, QI Renlong. Shipment electric network trouble diagnosis optimized method based on generic algorithm[J]. Ship Science and Technology, 2016, 38(12): 88-90.
- [15] 孙静, 秦世引, 宋永华. 模糊 PETRI 网在电力系统故

- 障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 78-83.
- SUN Jing, QIN Shiyin, SONG Yonghua. Fuzzy PETRI nets and its application in the fault diagnosis of electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 78-83.
- [16] 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 Jianwei, HE Zhengyou. Power system fault diagnosis based on time series fuzzy Petri nets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 46-51.
- [17] 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 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): 246-252.
- [18] 郭文鑫, 文福拴, 廖志伟, 等. 基于时序约束网络的电力系统在线警报处理解析模型[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(21): 36-42, 65.
- GUO Wenxin, WEN Fushuan, LIAO Zhiwei, et al. An analytic model for power system on-line alarm processing based on temporal constraint network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(21): 36-42, 65.
- [19] 林嘉宜, 彭宏, 谢嘉孟, 等. 不确定时态信息表示的统一模型[J]. 计算机应用, 2005, 25(3): 611-614, 656.
- LIN Jiayi, PENG Hong, XIE Jiameng, et al. Unified model for uncertain temporal information representation[J]. Computer Application, 2005, 25(3): 611-614, 656.
- [20] 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 Xiaoyang, XIE Hongtao, SUN Mingwei. 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.
- [21] 张勇, 张岩, 文福拴, 等. 基于时序因果网络的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(9): 47-53.
- ZHANG Yong, ZHANG Yan, WEN Fushuan, et al. A temporal caused-effect net based approach for power system fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(9): 47-53.
- [22] 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 Zhan, MIAO Shihong, SUN Yanbin, 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.
- [23] 单宝峰. 含分布式电源的配电网故障诊断研究[D]. 青岛: 青岛大学, 2018.
- SHAN Baofeng. Research on distribution network fault diagnosis with distributed generation[D]. Qingdao: Qingdao University, 2018.
- [24] 陈晓龙, 李永丽, 谭会征, 等. 含逆变型分布式电源的配电网自适应正序电流速断保护[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 107-112.
- CHEN Xiaolong, LI Yongli, TAN Huizheng, et al. An adaptive instantaneous trip protection based on positive sequence current for distribution network with IBDG[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 107-112.
- [25] 陈晓龙. 适应分布式电源接入的配电网保护与控制技术研究[D]. 天津: 天津大学, 2015.
- CHEN Xiaolong. Research on protection and control technology for distribution network with the distributed generation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2015.
- [26] 梁瑜娜. 配电网故障诊断的 Petri 网建模与仿真研究[D]. 青岛: 山东科技大学, 2017.
- LIANG Yuna. Modeling and simulation of distribution network fault diagnosis based on Petri nets[D]. Qingdao: Shandong University of Science and Technology, 2017.
- [27] 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.
- [28] 赖宏毅, 汪旻, 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 Hongyi, WANG Yang, YANG Wen, 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.
- [29] 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.
- CHEN Jingqiu. Study of fault diagnosis in uncertain power system on information fusion[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.

收稿日期: 2019-02-25; 修回日期: 2019-05-16

作者简介:

杨斐然(1994—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化; E-mail: 357668306@qq.com

于永进(1980—), 男, 通信作者, 讲师, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制。E-mail: yajdjt@163.com

(编辑 葛艳娜)