

基于事件起点的层次化时序 Petri 网及其电网故障诊断方法

赖宏毅¹, 汪 旻¹, 杨 雯², 周超凡¹, 徐 彪², 尹项根², 简 程²

(1. 国家电网华中电力调控分中心, 湖北 武汉 430077;

2. 华中科技大学 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 电网发生故障后利用大量告警信息快速准确地识别故障元件是保障可靠供电和电网安全稳定运行的首要任务。为适应电网运行调控需求, 提出一种基于事件起点的层次化加权模糊时序 Petri 网故障诊断方法。在完善母线和线路的层次化加权模糊时序 Petri 网模型的基础上, 以故障发生时刻为事件起点, 确立各初始库所的时序属性, 并通过逆向和正向时序推理对保护和断路器动作信息进行时序约束检查和置信度修正。IEEE 39 节点系统仿真算例和电网实际故障算例表明所提方法能够在保护和断路器误动/拒动、告警信息缺失/错误等复杂状态下识别真实故障元件, 提高了故障诊断的准确度和容错性。此外所提方法还可以得到设备故障的时间点约束, 有利于进一步分析故障原因和故障事态发展。通过与现有应用时序信息的故障诊断方法相比, 所提方法时序推理过程简明清晰, 对网络拓扑的变化适应性强, 运算速度快, 满足在线诊断需求。

关键词: 故障诊断; 加权模糊时序 Petri 网; 时序约束; 事件起点

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2018.02.026

0 引言

当电网发生故障时, 快速准确的故障诊断对加快事故处理和系统恢复进程、保证电力系统的安全可靠运行至关重要。然而随着电网的不断发展和互联, 在故障发生后的短时间内, 保护及断路器动作等大量告警信息涌向调度中心, 且可能伴随信息缺失、畸变等不确定性, 利用告警信息快速准确地识别故障元件能为电网实时调控运行提供重要的决策支持。

目前较为实用的电力系统故障诊断方法主要包括基于专家系统^[1]和基于解析模型^[2-4]的方法。此外, 人工神经网络^[5]、贝叶斯网络^[6]、支持向量机^[7]、Petri 网^[8]等理论方法也逐步应用于电力系统故障诊断研究。其中, Petri 网因推理过程简单、物理意义清晰、推理逻辑严密一直是电网故障诊断研究领域的热点, 模糊 Petri 网的提出有效弥补了传统 Petri 网在处理不确定性问题上的缺陷。文献[9]提出了基于加权模糊推理 Petri 网的电网故障诊断模型, 通过优化模型结构来降低模型矩阵的规模, 提高了诊断的准确性和速度; 文献[10]提出基于方向性加权模糊 Petri 网的诊断方法, 通过分别在各故障蔓延方向上建立诊断模型, 以改善模型的容错性和对

网络拓扑变化的适应性。为消除时序不一致和错误告警信息的影响, 文献[11]利用保护和断路器的动作时序关系, 建立与某元件相关的多个库所时序关联矩阵, 对比典型时序关联模型对保护和断路器的告警信息进行纠错; 文献[12]对线路两侧不同保护、断路器之间的时序进行交叉检查, 得到保护与断路器之间时序配合的一致性并修正诊断模型; 文献[13]考虑元件故障、保护动作和断路器跳闸之间的延时约束, 通过将时序约束网络和模糊 Petri 网进行融合实现错误警报的自动过滤。

上述方法应用于电网故障诊断有一定的容错性和适应性, 但存在以下局限: ①对于告警信息时序特性的利用主要局限于告警信息的筛选和验证阶段, 难以制定完善的告警信息时序比较规则, 且说服力不强; ②时序信息计算量大, 难以满足电力系统在线诊断的需求; ③在保护和断路器误动/拒动、告警信息缺失/错误的情况下, 模型的容错性不强, 处理复杂故障时可能得不到明确的诊断结果。

在上述背景下, 本文提出一种基于事件起点的层次化加权模糊时序 Petri 网 TWFPN (Temporal Weighted Fuzzy Petri Net) 故障诊断方法, 以故障发生时刻作为事件起点, 提出基于事件起点的保护和断路器时序约束检查方法, 针对可疑故障元件的 TWFPN 模型, 通过逆向时序推理获得该元件的故障时间点约束, 再通过正向时序推理对告警信息的初始置信度予以修正, IEEE 39 节点系统仿真算例和电网实际故障算例表明该方法能够在保护和断路器

收稿日期: 2017-01-14; 修回日期: 2017-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51277084, 508770-31)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China (51277084, 50877031)

误动/拒动、告警信息缺失/错误等复杂状态下识别真实故障元件,提高了故障诊断的准确度和容错性。通过与现有应用时序信息的故障诊断方法相比,本文提出的故障诊断方法充分利用了报警信息的时序信息与约束关系,时序推理过程简明清晰,对网络拓扑的变化适应性强,运算速度快,满足在线诊断需求。

1 TWFPN

1.1 TWFPN 的定义

传统的模糊 Petri 网 (FPN)^[14] 考虑了保护和断路器动作的不确定性以及误动/拒动的可能性,采用加权方式描述不同保护和断路器动作对诊断结果的影响,通常定义为一个 8 元组: $S_{\text{FPN}} = \{P, R, I, H, O, W, M, U\}$ 。其中, $P = [p_1, p_2, p_3, \dots, p_m]$ ($m \geq 0$) 为 m 维库所向量,用于表示命题, m 为库所数量; $R = [r_1, r_2, r_3, \dots, r_n]$ ($n \geq 0$) 为 n 维变迁向量,用于表示推理规则, n 为变迁数量; $I = (\delta_{ij})_{m \times n}$ 为直接输入矩阵,表示库所 P 到变迁 R 的映射关系, $\delta_{ij} \in \{0, 1\}$, 当库所 p_i 存在到变迁 r_j 的直接有向弧,即 p_i 是 r_j 的直接输入时, $\delta_{ij} = 1$, 否则 $\delta_{ij} = 0$; $H = (\gamma_{ij})_{m \times n}$ 为抑制输入矩阵, $\gamma_{ij} \in \{0, 1\}$, 当库所 p_i 存在到变迁 r_j 的抑制输入弧,即 p_i 是 r_j 的抑制输入时, $\gamma_{ij} = 1$, 否则 $\gamma_{ij} = 0$; $O = (\zeta_{ij})_{n \times m}$ 为输出矩阵, $\zeta_{ij} \in \{0, 1\}$, 表示变迁 R 到库所 P 的映射关系,当变迁 r_i 存在到库所 p_j 的有向弧,即 p_j 是 r_i 的输出时, $\zeta_{ij} = 1$, 否则 $\zeta_{ij} = 0$; $W = (\omega_{ij})_{m \times n}$ 为输入弧的权值矩阵, $\omega_{ij} \in \{0, 1\}$, 表示命题对相应规则的影响程度; $M = [M_1, M_2, M_3, \dots, M_m]^T$ 为 m 维库所置信度向量, M_i 表示库所 p_i 对应的命题为真的置信度,库所的初始置信度向量用 M^0 表示; $U = \text{diag}(\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n)$ 为规则的置信度矩阵, μ_i 为变迁 r_i 的置信度。

鉴于篇幅限制, TWFPN 的运算规则及推理过程此处不详述,具体可参考文献[10-11]。

为了充分利用保护和断路器的动作时序信息和约束关系,本文研究一种基于事件起点的层次化 TWFPN, f 为可疑故障元件,将元件 f 故障发生的时刻 t_f 定义为事件起点,引入保护动作时限约束以及保护动作和对应断路器跳闸之间的时间约束,通过时序约束检查来修正其对应的初始置信度向量 M^0 , 将 TWFPN 定义为一个 11 元组: $S_{\text{TWFPN}} = \{P, R, I, H, O, W, M, U, t, T, D\}$ 。

其中, P, R, I, H, O, W, M, U 与前述定义一致; $t = [t_{p1}, t_{p2}, t_{p3}, \dots, t_{pm}]$ (m 维) 为系统获取的库所初

始状态信息发生时间, t_{pi} 对应库所 p_i 的告警信息获取时间点; $T = \{T(t_{pi}) \mid p_i \in P\}$ 为时间点约束集合,与 t 中元素相对应, $T(t_{pi})$ 表示库所 p_i 对应的告警信息应该出现的时间区间; $D = \{D(t_f, t_{pi}) \mid p_i \in P\}$ 为时间距离约束集合, $D(t_f, t_{pi})$ 表示库所 p_i 所对应的告警信息的获取时间与事件起点 t_f 之间的时间距离约束。

1.2 TWFPN 中的时序约束

文献[15]构建了时序信息的警报处理解析模型,提出了基于时序约束网络中时间点和时间距离约束等相关概念。时间点约束用于描述事件发生时间 t 的不确定性,定义时间区间 $T(t) = [t^-, t^+]$ 为时间点约束, $t \in T(t)$, 其中 t^- 和 t^+ 分别为 $T(t)$ 的起点和终点,当 $t^- = t^+$ 时, t 就是一个确定的时间点。时间距离指 2 个时间点之间的时间长度,用 $d(t_i, t_j)$ 表示时间点 t_i 和 t_j 之间的时间距离,即 $d(t_i, t_j) = t_j - t_i$ 。定义 $D(t_i, t_j) = [\Delta t_{ij}^-, \Delta t_{ij}^+]$ 表示时间距离 $d(t_i, t_j)$ 的约束,即 $d(t_i, t_j) \in D(t_i, t_j)$, 其中 Δt_{ij}^- 和 Δt_{ij}^+ 分别为 $D(t_i, t_j)$ 的起点和终点。

定义 TWFPN 模型中各初始库所的时序属性为 $\{p_i, t_{pi}, T(t_{pi}), D(t_f, t_{pi})\}$, 过渡库所无实际物理意义,不具备时序属性。时序属性描述了库所 p_i 告警信息的获取时间、时间点约束及与事件起点间的时间距离约束。其中, t_{pi} 可直接获取,若没有则此项为空; $T(t_{pi})$ 需根据后文 2.3 节中基于事件起点的保护和断路器的时序约束检查方法来确定; $D(t_f, t_{pi})$ 根据保护和断路器的动作规则确定。

电网故障后的告警信息主要包含各保护和断路器动作信息及其发生时刻,可将其表达为保护出口动作时刻 (R, t_R) 和断路器跳闸时刻 (CB, t_{CB})。为保证保护动作的选择性,不同保护设定了不同的动作延时,保护动作时刻和其对应断路器的跳闸时刻之间也存在着时间约束。定义 $D(t_f, t_m)$ 、 $D(t_f, t_{ml})$ 、 $D(t_f, t_s)$ 分别为元件故障到主保护、断路器失灵保护、远后备保护动作的时间距离约束, $D(t_R, t_{CB})$ 为保护动作到其对应的断路器跳闸的时间距离约束。给定各时间距离约束^[16]为:

$$D(t_f, t_m) = [10, 40] \text{ ms}, D(t_f, t_s) = [600, 1100] \text{ ms} \\ D(t_f, t_{ml}) = [300, 500] \text{ ms}, D(t_R, t_{CB}) = [40, 60] \text{ ms}$$

TWFPN 模型中所有告警信息都可转换到以事件起点为基准的时间距离约束下,保护动作告警信息相对于事件起点的时间距离约束为 $D(t_f, t_R)$, 断路器跳闸告警信息相对于事件起点的时间距离约束为 $D(t_f, t_{CB}) = D(t_f, t_R) + D(t_R, t_{CB})$ 。

2 基于事件起点的层次化 TWFPN 电网故障诊断模型

以图 1 所示的 IEEE 10 机 39 节点系统为例,说明基于事件起点的层次化 TWFPN 模型的构建方法。

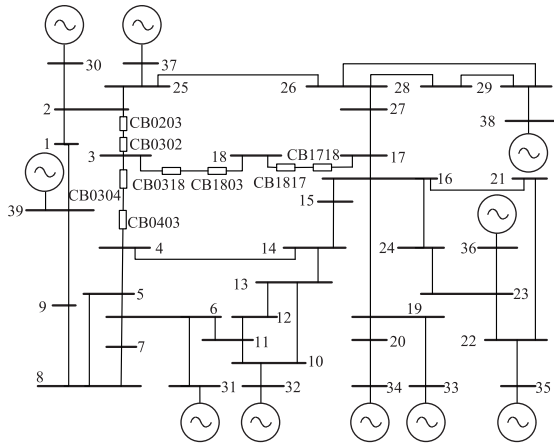


图 1 IEEE 10 机 39 节点系统

Fig.1 IEEE 10-generator 39-bus system

Petri 网运用图形化的表示方法对于描述具有一定逻辑关系的离散事件具有很大的优势,且可以应用矩阵分析方法进行推理,但当对大规模复杂电网运用 Petri 网进行建模时,可能出现矩阵维数太大、组合爆炸以及模型的适应能力差等问题,本文采用层次化建模的方法,通过分析故障发生后的保护和断路器动作过程,反向建立母线和线路层次化的 TWFPN 模型。本文在建模时对元件的保护配置考虑如下:每条线路的两端都配置了主保护、断路器失灵保护以及远后备保护;每条母线配置了主保护和相邻线路上的远后备保护。其他保护配置情况则可以根据实际的保护配置对模型作相应调整即可。对下文中的 Petri 网符号备注如下:B 表示母线,L 表示线路,CB 表示断路器,R 表示保护,并用 m、mf 和 s 分别表示主保护、断路器失灵保护和远后备保护,R0318m 表示线路 L0318 靠近母线 B03 一侧的主保护,R1803m 表示线路 L0318 靠近母线 B18 一侧的主保护,其他依此类推。

2.1 母线和线路的层次化 TWFPN 模型

当线路发生故障时,首先由线路两端各自的主保护动作于相应断路器跳闸,当某个断路器拒动时启动该断路器的失灵保护跳开该线路母线背侧断路器,当主保护和断路器失灵保护动作失败后,由远后备保护动作隔离故障。根据线路故障后的保护和断路器动作过程,反向建立其层次化 TWFPN 模型,即

先对线路两端分别建立主保护、断路器失灵保护、远后备保护诊断子网,再联合 3 个保护诊断子网形成各端的诊断虚拟库所,最后联合两端的各自虚拟库得到最后的综合诊断结果。以图 1 中的线路 L0318 为例建立的层次化 TWFPN 模型,如图 2 所示。图中, $p_1, p_2, \dots, p_{19}$ 为初始库所; $p_{20}, p_{21}, \dots, p_{27}$ 为过渡库所; p_{28} 为原因库所; $r_1, r_2, \dots, r_6$ 为保护动作变迁; $r_7, r_8, \dots, r_{13}$ 为过渡变迁。

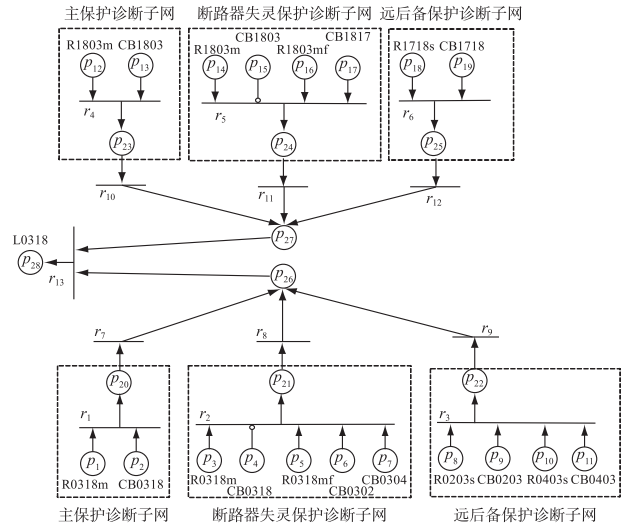


图 2 L0318 的层次化 TWFPN 模型

Fig.2 Hierarchical TWFPN model of L0318

类似地,可以构造母线的层次化 TWFPN 模型,先对每个母线出线方向建立主保护和远后备保护诊断子网,再联合 2 个保护诊断子网形成各出线方向的诊断虚拟库所,最后联合各出线方向的虚拟库得到最后的综合诊断结果。针对图 1 中的母线 B18,建立的层次化 TWFPN 模型如图 3 所示。图中, $p_1, p_2, \dots, p_8$ 为初始库所; $p_9, p_{10}, \dots, p_{14}$ 为过渡库所; p_{15} 为原因库所; r_1, r_2, r_3, r_4 为保护动作变迁; $r_5, r_6, \dots, r_9$ 为过渡变迁。

2.2 TWFPN 模型参数设置

a. 输入弧权值。

在元件的 TWFPN 模型中,保护和断路器对应的输入弧权值代表了其对诊断结果的影响差别,目前相关文献中输入弧权值大多根据经验人为设定^[10,12,17],本文认为一方面保护动作是断路器动作的前提,元件故障后通常是由保护动作引发断路器跳闸,另一方面保护动作与元件故障的关联性更大,一种保护通常与相应元件故障直接关联,而一个断路器可由多种保护触发使其跳闸,断路器跳闸与故障元件之间指向性不明显,需通过相关保护来加强其判断,因此保护相较于断路器,对故障诊断结果的

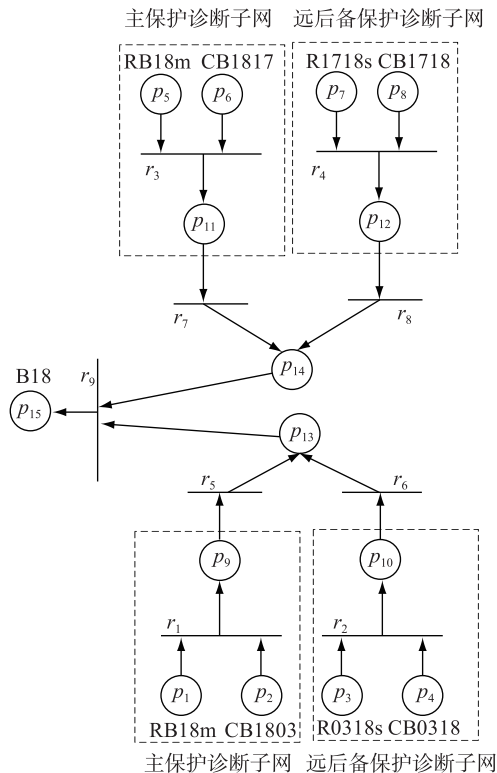


图3 B18的层次化TWFPN模型

Fig.3 Hierarchical TWFPN model of B18

影响更大。对于某一具体变迁,将输入库所中保护部分和断路器部分对应的输入弧的权值分别设定为0.6和0.4;对线路综合诊断模型中两端诊断虚拟库所对应的输入弧权值分别设定为0.5和0.5;对母线综合诊断模型中各出线方向的诊断虚拟库所对应的输入弧权值设为 $1/\alpha$, α 表示这条母线的出线数。

b. 库所初始置信度。

电网故障后保护和断路器存在误动、拒动的风险,上传到调度中心的告警信息也可能伴随信息缺失、畸变等不确定性。对保护和断路器对应的库所,应根据不同的保护和断路器警报信息对故障诊断的作用差别给定库所的初始置信度,初始置信度的设置基于全国电网继电保护与安全自动装置动作情况统计,具体赋值如表1所示^[12]。

表1 已动作的保护和断路器对应库所的初始置信度

Table 1 Initial confidence level of corresponding library to operated protection and circuit breaker

元件	主保护		断路器失灵保护		远后备保护	
	保护	断路器	保护	断路器	保护	断路器
线路	0.991 3	0.983 3	0.8	0.85	0.7	0.75
母线	0.856 4	0.983 3	—	—	0.7	0.75

考虑到保护和断路器警报信息中可能夹杂着扰动信息以及信息存在丢失的情况,对未收到告警信息的保护和断路器对应的库所给定一个较小的置信

度,如表2所示。

表2 未动作的保护和断路器对应库所的初始置信度

Table 2 Initial confidence level of corresponding library to non-operated protection and circuit breaker

元件	主保护		断路器失灵保护		远后备保护	
	保护	断路器	保护	断路器	保护	断路器
线路	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
母线	0.2	0.2	—	—	0.2	0.2

过渡库所和原因库所的初始置信度设为0。

c. 变迁置信度。

考虑到不同类型的保护其原理、性能及可靠性都不一样,故在反向的诊断推理过程中对诊断结果的影响程度也不一样,据此赋予变迁不同的置信度^[17],规定主保护、断路器失灵保护、远后备保护的变迁置信度分别为1、0.95和0.85,过渡变迁无物理意义,将其置信度设为1。

2.3 基于事件起点的保护和断路器时序约束检查

在1.2节TWFPN的时序约束介绍的基础上,根据各告警信息的获取时间与事件起点之间的时间距离约束进行保护和断路器的时序约束检查,包括2个过程:通过逆向时序推理获取故障发生的时间区间;再通过正向时序推理对保护动作信息和断路器跳闸信息进行检查,并修正其对应库所的置信度。

对下文中的时序约束检查过程中的符号备注如下: $T(f)$ 表示可疑故障元件 f 事件起点的时间点约束,表示事件起点 t_f 应该出现的时间区间,特殊地, $T(f_s)$ 表示由各个保护及断路器告警信息逆向推理直接得到的事件起点的第一推算时间点约束, $T(f)'$ 表示在 $T(f_s)$ 的基础上经过时序约束合并得到的事件起点的第二推算时间点约束。

a. 逆向时序推理。

结合可疑故障元件 f 的TWFPN模型,利用其相关告警信息获取时间 t_{pi} 和时间距离约束 $D(t_f, t_{pi})$ 进行逆向时序推理来获取事件起点的时间点约束,即:

$$T(f) = t_{pi} - D(t_f, t_{pi})$$

由各个保护及断路器告警信息得到的事件起点的第一推算时间点约束分别为 $T(f_1)$ 、 $T(f_2)$ 、 $\dots$ 、 $T(f_s)$ 。

若 $T(f_1) \cap T(f_2) \cap \dots \cap T(f_s) \neq \emptyset$,即当第一推算时间点约束有区间重叠时,说明 f 是这些保护和断路器告警信息共同的原因事件,即元件 f 的故障导致了相关保护和断路器的动作。将第一推算时间点约束直接求交集,得到事件起点唯一的第二推算时间点约束 $T(f)^1 = T(f_1) \cap T(f_2) \cap \dots \cap T(f_s)$ 。

若 $T(f_1) \cap T(f_2) \cap \dots \cap T(f_s) = \emptyset$, 即当第一推算时间点约束没有共同的重叠区间时, 说明这些保护和断路器告警信息中存在一部分不是以故障元件 f 作为原因事件的, 而是由其他故障导致的告警信息或者是错误的告警信息, 需对其进行筛选和置信度修正。分别将有重叠区间的第一推算时间点约束合并, 得到可疑故障元件 f 的可能的多个第二推算时间点约束 $T(f)^1, T(f)^2, \dots, T(f)^r$ 。

b. 正向时序推理。

针对可疑故障元件 f 的每个第二推算时间点约束, 分别进行正向时序推理, 得到 TWFPN 中各初始库所的时间点约束, 即:

$$T(t_{pi}) = T(f)^r - D(t_f, t_{pi})$$

将各初始库所告警信息获取时间点 t_{pi} 与基于事件起点进行正向推理得到的各初始库所的时间点约束 $T(t_{pi})$ 进行对比分析。如果各初始库所的告警获取时间满足时间点约束条件, 则认为该库所的状态信息是支持可疑故障元件 f 在该事件起点下的 TWFPN 的诊断推理的, 将该库所的置信度提高。由于线路主保护及其对应的断路器、母线主保护对应的断路器初始置信度值已经很高, 接近于 1, 不必进行修正。其余保护及断路器在初始置信度值的基础上增加 0.1; 如果不满足时间点约束条件, 将该库所的置信度降低, 设为 0.1; 没有收到告警信息的库所置信度仍设为 0.2; 过渡库所和原因库所的置信度仍为 0。

3 基于事件起点的层次化 TWFPN 电网故障诊断流程

基于事件起点的层次化 TWFPN 的电网故障诊断流程如下:

a. 根据收到的保护和断路器告警信息, 利用结线分析法进行搜索, 得到故障区域, 确定可疑故障元件集 $(f_1, f_2, \dots, f_k)$;

b. 针对各个可疑故障元件 f_k 建立层次化的 TWFPN 模型, 获取各初始库所的时序属性;

c. 结合 f_k 的 TWFPN 模型, 根据该模型中各个初始库所告警信息获取时间和时间距离约束进行逆向时序推理, 并将有重叠区间的时序约束合并, 得到 f_k 基于事件起点的可能的多个第二推算时间点约束 $T(f)^1, T(f)^2, \dots, T(f)^r$;

d. 针对得到的可疑故障元件 f_k 的事件起点的第二推算时间点约束, 进行正向时序推理, 可以得到 TWFPN 中事件起点为 $T(f)^r$ 下各初始库所的时间

点约束 $T(t_{pi})$, 将其与各初始库所告警获取时间点 t_{pi} 进行对比分析, 修正初始库所的置信度;

e. 结合 f_k 的 TWFPN 的诊断模型, 进行矩阵推理计算, 得到 f_k 在时间点约束 $T(f)^r$ 下的故障置信度;

f. 针对可疑故障元件 f_k 的事件起点的可能的多个第二推算时间点约束, 重复步骤 d、e 得到可疑故障元件不同时间点约束下的多个可能的故障置信度, 通过对比取最大值为 f_k 的最终故障置信度, 对应的时间点约束即为故障发生的时间区间;

g. 针对故障元件集中每个可疑元件, 重复步骤 b—f, 综合得到诊断结果;

h. 根据诊断结果, 将故障元件 TWFPN 模型中各初始库所告警获取时间点 t_{pi} 与其在事件起点下的时间点约束 $T(t_{pi})$ 进行对比分析, 以判断保护与断路器的拒动、误动及漏报、误报情况。

故障置信度阈值的设定十分重要, 是判断元件故障与否的重要依据, 必须保证在故障后保护和断路器的极端动作情况下, 也能准确地判别出故障。考虑存在一个告警信息出错的情况, 当线路两端或母线各出线方向均由远后备保护动作切除故障时, 元件的故障置信度最小, 为 0.518 5, 因此本文取故障置信度的阈值为 0.518 5, 判定大于 0.518 5 的元件发生故障, 否则认为无故障。

4 算例仿真分析与比较

以图 1 所示 IEEE 39 节点系统为例, 故障后调度中心收到的告警信息为 $(R1803m, 0)$ 、 $(R0318m, 2)$ 、 $(RB03m, 5)$ 、 $(CB0302, 58)$ 、 $(CB0304, 63)$ 、 $(R1803mf, 320)$ 、 $(CB1817, 368)$, 时标以收到的第一个告警信息时间点为基准, 单位为 ms。用层次化 TWFPN 模型对该案例进行故障诊断, 完整诊断流程如下。

首先利用结线分析法搜索故障区域, 得到可疑故障元件为线路 L0318、母线 B03 和母线 B18, 分别建立其层次化 TWFPN 模型。

根据图 2 所示 L0318 的层次化 TWFPN 模型, 收集与 L0318 相关的告警信息, 可得 $(R1803m, 0)$ 、 $(R0318m, 2)$ 、 $(CB0302, 58)$ 、 $(CB0304, 63)$ 、 $(R1803mf, 320)$ 、 $(CB1817, 368)$ 。根据各初始库所报警信息获取时间点和时间距离约束进行逆向时序推理, 得到 L0318 事件起点的第一推算时间点约束为:

$$T(L0318_1) = t_{R1803m} - D(t_f, t_m) = [-40, 10] \text{ ms}$$

$$T(L0318_2) = t_{R0318m} - D(t_f, t_m) = [-38, -8] \text{ ms}$$

$$T(L0318_3) = t_{CB0302} - D(t_f, t_m) - D(t_R, t_{CB}) = [-502, -282] \text{ ms}$$

$$T(L0318_4) = t_{CB0304} - D(t_f, t_m) - D(t_R, t_{CB}) = [-497, -277] \text{ ms}$$

$$T(L0318_5) = t_{R1803mf} - D(t_f, t_m) = [-180, -20] \text{ ms}$$

$$T(L0318_6) = t_{CB1817} - D(t_f, t_m) - D(t_R, t_{CB}) = [-192, -28] \text{ ms}$$

$T(L0318_1) \cap T(L0318_2) \cap T(L0318_3) \cap T(L0318_4) \cap T(L0318_5) \cap T(L0318_6) = \emptyset$, 分别将有重叠区间的时间点约束合并, 得到 L0318 事件起点的第二推算时间点约束 $T(L0318)^1 = [-38, -10] \text{ ms}$ 和 $T(L0318)^2 = [-497, -282] \text{ ms}$ 。

针对 $T(L0318)^1 = [-38, -10] \text{ ms}$ 进行正向时序推理, 得到各初始库所的时间点约束为:

$$T(R1803m) = T(L0318)^1 + D(t_f, t_m) = [-28, 30] \text{ ms}$$

$$T(CB0302) = T(CB0304) = T(CB1817) =$$

$$T(L0318)^1 + D(t_f, t_m) + D(t_R, t_{CB}) = [302, 550] \text{ ms}$$

$$T(R1803mf) = T(L0318)^1 + D(t_f, t_m) = [262, 490] \text{ ms}$$

将各报警信息获取时间与其时间点约束进行对比分析, R1803m、R0318m、R1803mf、CB1817 告警获取时间满足其时间点约束, RB03m、CB0302、CB0304 不满足其时间点约束, 修正库所的置信度向量为 $M^0 = [0.991\ 3, 0.2, 0.991\ 3, 0.2, 0.2, 0.85, 0.85, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.991\ 3, 0.2, 0.991\ 3, 0.2, 0.9, 0.95, 0.2, 0.2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$, 根据 L0318 的层次化 TWFPN 模型列出其余网络矩阵参数, 通过矩阵推理计算得到最终的库所置信度向量为 $M = [0.991\ 3, 0.2, 0.991\ 3, 0.2, 0.2, 0.1, 0.1, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.991\ 3, 0.2, 0.991\ 3, 0.2, 0.9, 0.95, 0.2, 0.2, 0.674\ 78, 0.349\ 02, 0.17, 0.674\ 78, 0.907\ 89, 0.17, 0.674\ 78, 0.907\ 89, 0.7913\ 35]^T$, 库所 L0318 的置信度为 0.791 335, 即

该时间点约束下 L0318 的故障置信度为 0.791 335。

类似地, 针对 $T(L0318)^2 = [-497, -282] \text{ ms}$ 进行正向时序推理并修正库所的置信度向量为 $M^0 = [0.1, 0.2, 0.1, 0.2, 0.2, 0.95, 0.95, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.1, 0.2, 0.1, 0.2, 0.1, 0.1, 0.2, 0.2, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]^T$, 通过矩阵推理计算得到库所 L0318 的置信度为 0.327 75。

通过对比在 $T(L0318)^1 = [-38, -10] \text{ ms}$ 和 $T(L0318)^2 = [-497, -282] \text{ ms}$ 下的故障置信度, 取较大值 0.791 335 为 L0318 的最终故障置信度, 对应的时间点约束 $[-38, -10] \text{ ms}$ 即为故障发生的时间区间。

类似地, 构建 B03 和 B18 的 TWFPN 模型, 利用其相关报警信息进行故障诊断, 诊断结果如表 3 所示。

综合以上诊断结果, 判定 L0318 和 B03 分别在 $[-38, -10] \text{ ms}$ 和 $[-35, -5] \text{ ms}$ 发生故障, B18 无故障, 根据故障元件 TWFPN 模型中各初始库所的时间点约束, 对比实际告警信息的获取时间, 分析得到如下结论: L0318 故障后, 线路两端主保护正确动作, 跳开线路两端断路器, CB0318 正确动作但其报警信息丢失, CB1803 拒动, 由 CB1803 的断路器失灵保护动作跳开 CB1817 以隔离故障; B03 故障后, 母线主保护正确动作跳开与母线相连的断路器 CB0318、CB0302 和 CB0304, CB0318 告警信息丢失。

用本文所提出的故障诊断方法对测试系统中的多种故障场景进行测试, 并且将其与文献[12]、[15]的诊断结果进行对比, 部分测试结果如表 4 所示。

表中, 案例 1—3 为信息完备情况下的诊断, 虽然保护和断路器的误动、拒动导致了故障区域的扩大, 但利用本文提出的基于事件起点的层次化 TWFPN 方法可以识别出误动或拒动信息而得出正

表 3 故障案例诊断结果

Table 3 Diagnosis results of fault case

可疑故障元件	TWFPN 模型相关的报警信息	相关报警信息对应的第一推算时间点约束/ms	第二推算时间点约束/ms	第二推算时间点约束对应的故障置信度	最终故障置信度	故障发生时间区间/ms	综合诊断结果及保护断路器动作评价
L0318	(R1803m,0)	[−40,−10]					L0318 故障 B03 故障 B18 无故障 CB0318 漏报 CB1803 拒动
	(R0318m,2)	[−38,−8]					
	(CB0302,58)	[−502,−282]	[−38,−10]	0.791 335	0.791 335	[−38,−10]	
	(CB0304,63)	[−497,−277]	[−497,−282]	0.327 75			
	(R1803mf,320)	[−180,−20]					
	(CB1817,368)	[−192,−28]					
B03	(RB03m,5)	[−35,−5]			0.862 72	[−35,−5]	
	(CB0302,58)	[−42,8]	[−35,−5]	0.862 72			
	(CB0304,63)	[−37,17]					
B18	(CB1817,368)	[268,318]	[268,318]	0.356 66	0.356 66	[268,318]	

确的诊断结果;案例4—7模拟存在保护和断路器误动、拒动以及告警信息缺失/错误等复杂状况下的故障诊断,本文提出的方法均能准确地得到诊断结果,提高了故障诊断的准确度和容错性。

对广州地区电力系统实际故障案例^[15]进行测试,鉴于篇幅限制,层次化 TWFPN 的建立及故障诊断的步骤和过程不详细给出,可疑故障元件的故障置信度及时间点约束分别为 (L2943, 0.890 32, [-38, -21] ms) 和 (B4, 0.434 99, [232, 278] ms)。综合诊断结论如下:线路 L2943 在 -38 ~ -21 ms 期间发生故障线路两端主保护正确动作并作用于相应断路器跳闸,由于 C12 拒动,其断路器失灵保护动作跳开母线 B4 背侧断路器以隔离故障。故障诊断结

果和实际发生的故障情况相符。

本文所提的电网故障诊断方法采用 MATLAB 工具实现,以上述算例为例,在主频为 2.6 GHz 双核处理器、内存容量为 2 GB 的 PC 机上,故障诊断过程所耗时间均在 18 ms 以内,能够满足电网故障诊断的在线要求。

此外,将本文方法与近年提出的 2 种利用时序信息的电网故障诊断方法进行了详细的性能对比分析,结果如表 5 所示。表中, β 为收到的报警信息的数目; γ 为可疑故障元件的数目。

通过表 4 中诊断结果的对比和表 5 中性能的对比可以发现,本文提出的方法充分利用了报警信息的时序信息与约束关系,通过将告警信息全部转换

表 4 基于事件起点的层次化 TWFPN 方法的故障案例诊断结果

Table 4 Diagnosis results of fault cases for hierarchical TWFPN model based on event-starting point

案例编号	收到的告警信息	本文方法诊断结果				实际故障元件	文献[12]诊断结果	文献[15]诊断结果
		可疑故障元件	故障置信度	故障发生的时间点约束/ms	保护和断路器动作评价			
1	(R1803s, 0), (R0403s, 2), (R0203s, 6), (CB1803, 48), (CB0403, 53), (CB0203, 56)	B03	0.697	[-1 094, -600]	B03m 拒动	B03	B03	—
		L0203	0.428 5	[-1 098, -600]				
		L0304	0.428 5	[-1 094, -600]				
		L0318	0.428 5	[-1 094, -594]				
2	(RB03m, 0), (CB0302, 49), (CB0304, 51), (R1803s, 650), (CB1803, 650), (CB0203, 700)	B03	0.877 11	[-40, -10]	CB0318 拒动 CB0203 误动	B03	B03	B03
		L0203	0.356 66	[-51, -1]				
		L0318	0.375 41	[600, 650]				
3	(R0318m, 0), (R0318mf, 308), (R1718s, 650), (CB1718, 705)	L0318	0.878 901	[-40, -10]	R1803m 拒动 CB0318 拒动	L0318	—	L0318
		B18	0.448 5	[-450, -50]				
		B03	0.408 88	[253, 305]				
		L1718	0.356 6	[605, 655]				
4	(R0318m, 0), (R0318m, 5), (R0318mf, 310), (R1803mf, 320), (CB0302, 368), (CB0304, 372), (R1817m, 120), (R1718m, 128), (CB1718, 143)	L0318	0.778 091	[-35, -10]	CB0318 拒动 CB1803 拒动 CB1817 漏报	L0318 L1718	L1718	L0318 L1718
		L1718	0.834 446	[88, 93]				
		B18	0.295 5	[-997, -467]				
		B03	0.408 8	[272, 318]				
5	(RB18m, 0), (CB1817, 35), (CB1803, 40), (CB1718, 96), (R1803m, 100), (CB0318, 135)	L0318	0.626 4	[60, 85]	R0318m 漏报 CB1718 误动	L0318 B18	L0318 B18	B18
		B18	0.740 24	[-40, -15]				
		B03	0.366 6	[-65, -15]				
6	(RB03m, 0), (CB0302, 38), (CB0304, 42), (RB14m, 250), (CB1404, 295), (CB1415, 298), (CB1413, 385), (R1803s, 598), (CB1803, 623)	B03	0.877 11	[-40, -10]	CB0318 拒动 CB1413 误报	B03 B14	B03 B14	B03 B14
		B14	0.849 39	[210, 240]				
		L0318	0.376 98	[523, 573]				
7	(R1803m, 0), (R0318m, 3), (CB0318, 40), (R1803mf, 200), (CB1817, 405)	L0318	0.831 44	[-37, -10]	CB1803 拒动 CB1803mf 误报	L0318	L0318	L0318
		B18	0.356 66	[305, 355]				

表 5 本文方法与现有方法的对比

Table 5 Comparison between proposed method and existing methods

方法	模型构建	对时序信息的利用	主要计算任务及运算速度
文献[12]	对故障元件进行分层建模,网络拓扑变化时需对每层模型及其相关矩阵进行调整	时序约束众多且计算繁琐,需要对两侧告警信息进行交叉检查	时序约束推理和矩阵运算,时序信息计算量为 $\beta^2\gamma$,运算速度较快
文献[15]	利用逻辑运算生成保护和断路器的期望状态,拓扑变化时保护和断路器的期望状态都需进行修正	时序关系约束库复杂,拓扑变化后需重新识别	时序约束搜索和整数优化求解,时序信息计算量为 $2^2\beta$,运算速度相对较慢
本文	根据元件保护配置进行层次化建模,拓扑变化时只需删减相应诊断子网,模型改动较小,矩阵调整简单	全部转换到以故障发生时刻为基准的时序约束下,简明清晰,易于推理	时序约束推理和矩阵运算,时序信息计算量为 $2\beta\gamma$,运算速度快

到以故障发生时时刻为基准的时序约束关系下,对保护、断路器告警信息进行时序约束检查,不仅可以得到设备的故障时间点约束,在保护和断路器误动/拒动、告警信息缺失/错误等复杂状况下具有较好的容错性,而且对网络拓扑的变化适应性强,时序推理过程简明清晰,运算速度快,满足在线诊断需求。

5 结语

本文研究一种基于事件起点的层次化 TWFPN 故障诊断方法,以故障发生时时刻作为事件起点,提出基于事件起点的保护和断路器时序约束检查方法,通过逆向和正向时序推理对保护和断路器动作信息置信度予以修正,提高了故障诊断的准确度和容错性。IEEE 39 节点系统仿真算例和电网实际故障算例表明该方法能够在保护和断路器误动/拒动、告警信息缺失/错误等复杂状态下识别真实故障元件,还可以得到设备故障的时间点约束,有利于进一步分析故障原因和故障事态发展。该方法充分利用了报警信息的时序信息与约束关系,时序推理过程简明清晰,对网络拓扑的变化适应性强,运算速度快,满足在线诊断需求,具有良好的应用前景。

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.
ZHAO Wei, BAI Xiaoming, DING Jian, et al. A new fault diagnosis approach of power grid based on cooperative expert system and multi-agent technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 1-8.
- [2] 张岩,张勇,文福拴,等. 融合信息理论的电力系统故障诊断解析模型[J]. 电力自动化设备,2014,34(2): 158-164, 174.
ZHANG Yan, ZHANG Yong, WEN Fushuan, et al. Analytical model for power system fault diagnosis integrated with information theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 158-164, 174.
- [3] 梁辰,邵能灵,胡炎,等. 基于保护信号的隐性故障检测[J]. 电力自动化设备,2016,36(5): 154-159.
LIANG Chen, TAI Nengling, HU Yan, et al. Detection of hidden failure based on protection signals[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(5): 154-159.
- [4] 田方媛,张岩,徐兵,等. 多代理系统框架下的主动配电系统故障诊断[J]. 电力自动化设备,2016,36(6): 19-26.
TIAN Fangyuan, ZHANG Yan, XU Bing, et al. Fault diagnosis based on multi agent system for active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 19-26.
- [5] 熊国江,石东源,朱林,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 Guojiang, SHI Dongyuan, ZHU Lin, et al. Fuzzy cellular fault diagnosis of power grids based on radial basis function neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 59-65.
- [6] 孙明蔚,童晓阳,刘新宇,等. 运用时序贝叶斯知识库的电网故障诊断方法[J]. 电网技术,2014,38(3): 715-722.
SUN Mingwei, TONG Xiaoyang, LIU Xinyu, et al. A power system fault diagnosis method using temporal Bayesian knowledge bases[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 715-722.
- [7] 胡伟,李勇,曹一家,等. 基于 LOF 和 SVM 的智能配电网故障辨识方法[J]. 电力自动化设备,2016,36(6): 7-12.
HU Wei, LI Yong, CAO Yijia, et al. Fault identification based on LOF and SVM for smart distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 7-12.
- [8] CALDERARO V, HADJICOSTIS C N, PIICCOLO A. Failure identification in smart grids based on Petri net modeling[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10): 4613-4623.
- [9] LUO Xu, KEZUNOVIC M. Implementing fuzzy reasoning Petri nets for fault section estimation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(2): 676-685.
- [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] 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 approach based on time sequence fuzzy Petri net[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(15): 46-51.
- [12] 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.
- [13] 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 Yan, ZHANG Yong, WEN Fushuan, 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.
- [14] LI Xiaou, LARA-ROSANO F. Dynamic knowledge inference and learning under adaptive fuzzy net framework[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Part C Applications and Reviews, 2008, 38(4): 442-450.
- [15] 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 online alarm processing based on temporal constraint network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009,

33(21):36-42,65.

- [16] 乐全明. 电网高级智能故障诊断系统中关键技术的研究[D]. 上海:上海交通大学,2006.

LE Quanming. Research on key techniques of advanced intelligent fault diagnosis system for power grid[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2006.

- [17] 陈强,程学珍,刘建航,等. 基于分层变迁的 WFPN 电网故障分析[J]. 电工技术学报,2016,31(15):125-135.

CHEN Qiang, CHENG Xuezheng, LIU Jianhang, et al. The analysis method of power grid fault based on hierarchical transition weighted fuzzy Petri net[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(15): 125-135.

作者简介:



赖宏毅

赖宏毅(1968—),男,湖北荆门人,高级工程师,主要研究方向为电力系统调度与控制(**E-mail**: laihy@cc.sgcc.com.cn);

汪 旸(1981—),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统调控运行与保护控制(**E-mail**: squall_wy@sina.com);

杨 雯(1993—),女,湖北襄阳人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为微机保护与控制(**E-mail**: 409708265@qq.com)。

Hierarchical temporal Petri net based on event-starting point and its fault diagnosis method of power grid

LAI Hongyi¹, WANG Yang¹, YANG Wen², ZHOU Chaofan¹, XU Biao², YIN Xianggen², JIAN Cheng²

(1. Central China Electric Power Dispatching and Control Sub-center of State Grid, Wuhan 430077, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The most important task to ensure reliable power supply and safe and stable operation of the power grid is the quick and accurate identification of the fault element based on mass warning information. A fault diagnosis method of hierarchical weighted fuzzy Petri net based on event-starting point is proposed to meet the needs of power grid operation and regulation. Based on the improvement of the hierarchical temporal weighted fuzzy Petri net of bus and line, the temporal attribute of each initial library is determined by taking the fault occurrence time as the event-starting point. The temporal constraint of the protection and circuit breaker operation is checked and their credibility is modified according to reverse and positive timing reasoning. The simulative results of IEEE 39-bus system and actual failure cases of a power grid show that the proposed method can identify the fault element under complicated conditions such as mal-operation or rejection of protection and circuit breaker and incompleteness or error of alarm information, and improve the accuracy and fault-tolerance of fault diagnosis. In addition, the proposed method can also get the time constraint of the fault element to further analyze the causes and development of the fault. Compared with the existing fault diagnosis methods based on temporal information, the proposed method has a simple and clear temporal reasoning process, strong adaptability to the change of network topology and rapid calculation speed, and meets the needs of online fault diagnosis.

Key words: fault diagnosis; temporal weighted fuzzy Petri net; temporal constraint; event-starting point