

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.03.014

基于加权模糊时序 Petri 网络的电网故障诊断模型

戢李刚¹, 陈昊², 谭风雷²

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 国网江苏省电力有限公司检修分公司, 江苏 南京 211106)

摘要:提出了一种基于加权模糊时序 Petri 网络(FTPN)的电网故障智能诊断模型,该模型主要包括停电区域识别、可能故障元件加权 FTPN 建模、故障元件集求解、保护/断路器动作情况判定4个部分。介绍了故障差错告警差错信息的分类以及故障告警信息时序特性,研究了断路器动作信息及网络拓扑关系,结合广度优先搜索,得到了停电区域识别方法。最后,以新英格兰10机39节点系统为例,建立了母线和线路加权 FTPN 故障诊断数学模型,并给出该系统的总体结构,结果表明该模型能够快速故障定位,准确提供保护和断路器动作评价信息。

关键词:电网故障;智能诊断;Petri 网络;停电区域;时间约束

中图分类号: TM727

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)03-0093-07

0 引言

随着我国能源互联网建设的不断推进,电网故障诊断的实时性与有效性日益受到关注。及时诊断出故障元件,建立良好的辅助决策系统和黑启动方案,防止事故的扩大,并及时恢复停电区域,是供电双方共同的迫切要求,也是建设能源互联网的重要保证。

与此同时,电网规模的不断扩大和拓扑结构的日益复杂,调控一体化、智能变电站及变电站无人值守技术的推广,负荷非线性特征提升^[1-2],大量甚至海量的告警信息将在故障发生后的短时间内涌入调控中心。发生复杂连锁故障后涌入调控中心调度控制系统的大量信息常常超出调度运行人员的处理能力,给其短时间内的判断决策带来困难,不利于对事故的快速反应和处理。因此使用高效的电网故障诊断系统进行决策,适应各种简单和复杂事故情况下故障的快速准确识别更具现实意义。

电网故障诊断主要依靠故障设备、断路器、保护装置的动作逻辑,以及调度运行人员经验形成的专家库来进行故障定位,推断故障类型,用精确的数学模型来描述这一过程相当困难。经过多年的发展,对于电力系统中单一电力设备的离线故障诊断方法已经比较成熟,但对于全电力系统的在线故障诊断仍处于理论研究阶段或者低电压简单配电网、简单拓扑电网的实际应用阶段。目前国内外研究较多的是基于专家系统、人工神经网络、解析模

型、Petri 网络(Petri net, PN)^[3-5]等故障诊断方法。文献[6]提出一种实用能量管理系统(energy management system, EMS)实时信息、测控单元、保护动作信息的电网故障诊断专家系统,可根据故障信息进行诊断分析,提供告警信息,并对事故后电力系统安全稳定情况作进一步评估和分析。文献[7]通过构建一种新型电网故障诊断优化模型,尝试找出传统解析诊断模型存在不唯一诊断结果的原因,改进了保护和断路器的期望状态函数。文献[8]发展了一种考虑保护和断路器时序特性的模糊 Petri 网(fuzzy Petri net, FPN)诊断模型,提出了部分保护/断路器信息缺失或错误情况下的容错算法。

基于上述分析,文中在充分研究加权 FPN 定义、图形表示、变迁时序约束以及推理分析的基础上,分析了电力系统停电区域识别方法和故障告警信息时序特性,最后,以新英格兰10机39节点系统为例,建立了母线和线路加权模糊时序 Petri 网络(fuzzy timing Petri net, FTPN)故障诊断数学模型,能够快速进行故障定位,提供保护和断路器动作评价信息。

1 加权 FPN 模型

PN 是用图形表示的组合模型,可以分为条件和事件两大类节点,是一种网状信息流模型,描述和分析并发现有其独到优越性。PN 是在有向图上添加令牌分布,有向图上的条件和事件作为节点,令牌表示状态信息,并按照引发规则使事件驱动状态进行演变。基于 PN 模型的故障诊断方法在故障诊断过程中仅用到常规矩阵计算,无需求出最优解。

FPN 在传统 PN 基础上进行了扩展:FPN 的所

收稿日期:2018-11-23;修回日期:2018-12-27

基金项目:国家大学生创新资助项目(201810429202,20181-0429220)

有库所 p 被置了一个 $[0, 1]$ 范围的实数作为令牌 (token) 值, 同时给每个变迁赋予一个确定性因子 (certainty factors, CF), 并定义了输入、输出函数, FPN 符合人类思维和认知方式, 仍属于人工智能领域的应用研究。

1.1 FPN 的定义

FPN 的定义采用基于知识表示的 FPN 结构表示, 定义加权 FPN 十一元组^[9-11]:

$$S_{\text{WFIPN}} = \{P, T, I, O, A_{cc}, \Delta T_{\min}, \Delta T_{\max}, U, T_{\text{hre}}, W, M\} \quad (1)$$

式中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 为库所集, n 为库所数; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_h\}$ 为代表推理规则的变迁集, h 为变迁数; $I: P \rightarrow T$ 表示反映库所到变迁的映射, $I = [\delta_{ij}]$ 为 $n \times h$ 矩阵, 当 p_i 是 t_j 的输入时 $\delta_{ij} = 1$, 否则 $\delta_{ij} = 0$; $O: T \rightarrow P$ 反映变迁到库所的映射, $O = [\gamma_{ij}]$ 为 $h \times n$ 矩阵, 当 p_j 是 t_i 的输出时 $\gamma_{ij} = 1$, 否则 $\gamma_{ij} = 0$; $A_{cc} = [a_{ij}]$ 为 $n \times n$ 矩阵, 表示一般库所到目的库所的通道, 当 p_i 的库所通过 p_j 时 $a_{ij} = 1$, 否则 $a_{ij} = 0$; $\Delta T_{\min} = [\Delta\tau_{1\min}, \Delta\tau_{2\min}, \dots, \Delta\tau_{n\min}]$ 表示库所和前置变迁最小的延时约束, $\Delta T_{\max} = [\Delta\tau_{1\max}, \Delta\tau_{2\max}, \dots, \Delta\tau_{n\max}]$ 表示库所和前置变迁最大的延时约束, 若 $\Delta\tau_{\min} = \Delta\tau_{\max} = 0$, 变迁 t 瞬间得到激活; $U = [u_1, u_2, \dots, u_h]$ 表示变迁 t 的置信度向量, 如果向量 U 中元素均为数字 1, 则表示该 PN 为简单 PN; $T_{\text{hre}} = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_h]$ 为变迁的触发阈值向量; $W = \text{diag}(w_1, w_2, \dots, w_n)$ 为输入库所到变迁有向弧的权值矩阵, 其值与库所表征的事件类型有关, 并且能反映前提条件对规则的影响程度; 库所置信度向量 $M = [\alpha(p_1), \alpha(p_2), \dots, \alpha(p_n)]$ 中的元素 $\alpha(p_i)$ 反映库所 p_i 的置信度。

1.2 FPN 的图形表示

PN 可以通过库所 $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 、变迁 $T = \{t_1, t_2, \dots, t_h\}$ 和有向弧表示。其中, “○”表示库所, “|”表示令牌, “|”表示变迁, 而有向弧分为两类: 由库所 p 指向变迁 t 的有向弧称为输入弧, 由变迁 t 指向库所 p 的有向弧称为输出弧。

图 1 为一个简单 PN, 当变迁 t_1 触发时 p_1 中的 token 将转移至 p_2 中。

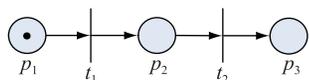


图 1 简单 PN 结构

Fig.1 Structure of simple Petri net

图 2 为加权 FPN 结构, 适用于不定态问题研究, 与图 1 相比加入了输入弧的权值 w 、库所的置信度 α 、变迁的置信度 μ 、概率值的变迁过程等。

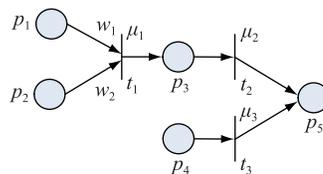


图 2 加权 FPN 结构

Fig.2 Structure of weighted fuzzy Petri net

1.3 FPN 的变迁时序约束

根据研究需要, 变迁 $t \in T$ 分为前向集和后向集, 前向集定义为 $\bullet t = \{p \mid \delta_{pt} = 1\}$, 而后向集定义为 $t \bullet = \{p \mid \gamma_{tp} = 1\}$ 。

元件库所的动作延时约束在图形表示上是变迁 t 的左右两个相邻库所 $\bullet t$ 和 $t \bullet$ 的延时区间 $T_{\bullet t} = [\tau_{\bullet t \min}, \tau_{\bullet t \max}]$ 和 $T_{t \bullet} = [\tau_{t \bullet \min}, \tau_{t \bullet \max}]$ 进行关联约束, 即 $\Delta T_t = [\Delta\tau_{t \min}, \Delta\tau_{t \max}]$, 如图 3 所示。

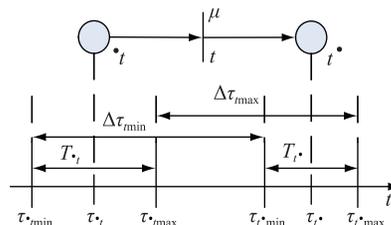


图 3 变迁延时约束关系

Fig.3 Transition delay constraints

(1) 前向推理。由 $T_{\bullet t}$ 和 ΔT_t , 可得前向集 $\bullet t$ 的后继元件库所的动作延时约束:

$$\begin{aligned} T_{t \bullet} &= T_{\bullet t} + \Delta T_t = [\tau_{\bullet t \min}, \tau_{\bullet t \max}] + [\Delta\tau_{t \min}, \Delta\tau_{t \max}] \\ &= [\tau_{\bullet t \min} + \Delta\tau_{t \min}, \tau_{\bullet t \max} + \Delta\tau_{t \max}] \end{aligned} \quad (2)$$

(2) 后向推理。由 $T_{t \bullet}$ 和 ΔT_t , 可得后向集 $t \bullet$ 的前序元件库所的动作延时约束:

$$\begin{aligned} T_{\bullet t} &= T_{t \bullet} - \Delta T_t = [\tau_{t \bullet \min}, \tau_{t \bullet \max}] - [\Delta\tau_{t \min}, \Delta\tau_{t \max}] \\ &= [\tau_{t \bullet \min} - \Delta\tau_{t \min}, \tau_{t \bullet \max} - \Delta\tau_{t \max}] \end{aligned} \quad (3)$$

1.4 FPN 的推理分析

加权 FPN 的模糊推理取决于模糊规则集合 $R = \{R_1, R_2, \dots, R_h\}$:

$$R_i: \text{If } d_j \text{ Then } d_k (\text{CF} = u_i) \quad i = 1, 2, \dots, h \quad (4)$$

式中: d_j 和 d_k 为含模糊变量的命题, 其库所置信度 $\alpha(d_j)$ 和 $\alpha(d_k)$ 取闭区间 $[0, 1]$ 中的值; 变迁置信度 $u_i \in [0, 1]$ 表征规则 R_i 的置信度, 并赋值给确定性因子; 模糊规则总数取变迁数总数 h 。

在加权 FPN 的推理过程中, 应计及延时约束。设 A, B, C 全部为 $h \times n$ 矩阵, 而 D 为 $h \times q$ 矩阵, E 为 $q \times n$ 矩阵, 定义如下算子:

(1) 加法算子 \oplus : $C = A \oplus B$, 则:

$$c_{ij} = \max(a_{ij}, b_{ij});$$

(2) 比较算子 \ominus : $C = A \ominus B$, 则:

当 $a_{ij} \geq b_{ij}$ 时 $c_{ij} = 1$, 否则 $c_{ij} = 0$;

(3) 直乘算子 \odot : $C = A \odot B$, 则:

$$c_{ij} = a_{ij} b_{ij};$$

(4) 乘法算子 \otimes : $C = D \otimes E$, 则:

$$c_{ij} = \max(d_{ik} e_{kj});$$

(5) 矩阵乘法 \cdot : $C = D \cdot E$, 则:

$$c_{ij} = \sum_{k=1}^q d_{ik} e_{kj}$$

当库所置信度矩阵 M 中的值不再随迭代而变化时, 加权 FTPN 推理过程进入稳定的网络状态。基于加权 FTPN 模型的故障诊断方法总体流程是: 在循环迭代过程之前, 利用延时约束条件对告警信息进行初步筛选, 缩小条件, 减少计算量; 随后进入主程序进行迭代计算, 在第 k 次迭代得到置信度矩阵 M 后计算第 $k+1$ 次置信度矩阵 M^{k+1} 的推理过程^[12-14]如下。

步骤一: 定义 A_{cc} 为库所的通路矩阵, 应用时序约束推理出库所通路对应的最小、最大累积延时约束矩阵 $\sum \Delta T_{\min}$ 和 $\sum \Delta T_{\max}$:

$$\sum \Delta T_{\min} = [A_{cc} (\Delta T_{\min})^T]^T \quad (5)$$

$$\sum \Delta T_{\max} = [A_{cc} (\Delta T_{\max})^T]^T \quad (6)$$

步骤二: 定义 $F = [f_1, f_2, \dots, f_n]$ 为库所的延时约束判定向量, “1”表示符合, “0”表示不符合。 ΔT_{mesmin} , ΔT_{mesmax} 与 $\sum \Delta T_{\min}$, $\sum \Delta T_{\max}$ 进行混合计算, 可得:

$$F = (\Delta T_{\text{mesmax}} \ominus \sum \Delta T_{\max}) \odot (\Delta T_{\text{mesmin}} \ominus \sum \Delta T_{\min}) \quad (7)$$

步骤三: 利用告警信号中的保护判据以及校正后的开关信息给定初始状态 M^0 , 令 $k=0$;

步骤四: 计算输入弧的权值:

$$W_{\text{inarc}} = W \cdot I \quad (8)$$

步骤五: 计算变迁的合成输入可信度:

$$E^k = M^k \cdot W_{\text{inarc}} \quad (9)$$

步骤六: 比较变迁的触发阈值与合成输入可信度, 求出满足激活条件的变迁集合:

$$G^k = E^k \ominus T_{\text{hre}} \quad (10)$$

步骤七: 计算使得变迁激活的输入可信度:

$$H^k = E^k \odot G^k \quad (11)$$

步骤八: 计算库所第 $k+1$ 次推理的 M^{k+1} :

$$M^{k+1} = [(H^k \odot U) \otimes O] \oplus M^k + \{M^k \cdot (W \cdot I) \odot [M^k \cdot (W \cdot I) \ominus T_{\text{hre}}] \odot U \otimes O\} \oplus M^k \quad (12)$$

步骤九: 若 $M^{k+1} = M^k$, 表明 PN 的置信度矩阵处于稳定状态, 否则令 $k=k+1$, 返回步骤四。

2 电力系统停电区域识别

电力系统规模庞大, 如果每次故障诊断都对所有元件进行分析, 将会带来大量不必要的工作。系统发生故障后, 与故障元件对应的保护和断路器都会动作, 系统分为几个子区域, 故障元件将被隔离在无源子区域中。因此, 通过断路器的状态和网络拓扑连接判定系统的无源区域, 可以将故障元件的搜索局限在停电区域中, 得到可能的故障设备, 再进行具体元件的诊断, 大大缩小求解规模、提高故障诊断效率, 并避免 PN 建模过程中发生组合爆炸。

文中将采用广度优先搜索 (breadth first search, BFS), 根据断路器动作信息、网络拓扑关系确定停电区域^[14-16]。在停电区域内有且仅有 1 个元件情况下, 该元件即为故障元件; 若停电区域内元件数大于等于 2, 则需要对所有元件分别建立加权 FPN 模型进行推理分析, 而后判断故障元件。搜索可能故障元件的具体步骤如下。

步骤一: 建立网络元件集合 C_{omp} , 子网络元件集合 C_{omps} , 可能故障元件集合 C_{fault} , 变位告警中的断路器信息集合 $A_{\text{larm_CB}}$;

步骤二: 取 $A_{\text{larm_CB}}$ 中的断路器 $A_{\text{larm_CB}i}$ 作为访问起始点, 令 $A_{\text{larm_CBtest}} = A_{\text{larm_CB}i}$;

步骤三: 搜索与 $A_{\text{larm_CBtest}}$ 相连接的元件集合 $C_{\text{omp}k}$, 再对 $C_{\text{omp}k}$ 中的元件 i 搜索与其相连接的闭合断路器 $A_{\text{larm_CBnext}}$ 。若 $A_{\text{larm_CBnext}} = A_{\text{larm_CB}i}$, 转入步骤五;

步骤四: 令 $A_{\text{larm_CBtest}} = A_{\text{larm_CBnext}}$, 返回步骤三;

步骤五: 将元件 i 入子网络集合 C_{omps} , 若 C_{omps} 中不含有源元件, 则停电区域由其中的元件组成, 将中的元件加入 C_{fault} ;

步骤六: 将 $A_{\text{larm_CBnext}}$ 从 $A_{\text{larm_CB}}$ 中扣除。若 $A_{\text{larm_CB}}$ 为空集, 则搜索结束, 否则置零 C_{omps} , 返回步骤二。

通过 BFS 可得到系统的停电区域, 若发生多重故障, 故障元件可能分布在几个小区域内, 则会得到多个停电区域。系统停电区域的搜索, 减小了诊断范围。确定停电区域后再针对停电区域内的元件进行诊断, 可减小 PN 建模规模、提高诊断效率。停电区域的形成依靠于网络拓扑和保护动作信息^[17]。电网故障时, 继电保护装置通过跳开相应断路器把故障元件从电网中隔离出来以确保非故障区域的持续供电和稳定运行。当继电保护将故障

切除后,故障元件处于相对孤立的无源区域中。结合断路器位置节点和网络连通性分析,可以搜索出这一无源区域,即故障元件所在区域。

3 基于时间约束的告警校核

在实际运行中,存在因保护或断路器的错误告警信息而造成的信息不确定性情况;另外,由于受到设备自动化水平和信息传输的影响,获取故障信息的完备性和实时性未必能满足实际需求。这些问题使得能更好适应大规模复杂电网的故障诊断建模和决策的研究方兴未艾。告警信息具有显著的时序特征,其背后隐含故障发展过程及保护/断路器动作逻辑。显然,利用告警信息时序特征将提高故障诊断的准确性和容错性。

3.1 不良告警信息分类

信息的不确定性客观存在且无法完全避免。一般地,不良告警信息可以分为三类:

(1) 信息丢失。指继保装置本身或开关量节点失灵、异常,或者故障时大量信息将传输通道拥塞导致的丢包,以及某个处理环节来不及处理信息导致保护断路器动作信息在采集和传输过程中缺失的情况。

(2) 误报。指继电保护装置、自动装置等发出错误的、不符合客观实际的告警信息。

(3) 时序错误。是指告警信息的时间约束不满足故障发生时保护断路器动作逻辑,不反应故障发展过程中继保及安全自动装置的动作先后次序。这类差错告警会导致故障诊断结果存在悖谬,或者无法诊断出故障元件,在电网发生复杂多重故障时得到悖谬结果甚至无法得出故障诊断结果的情况更为突出。

3.2 故障告警信息时序特性

阶段式继电保护装置为了满足选择性设有保护动作时间级差。某元件故障时告警信息时序特性如图4所示。

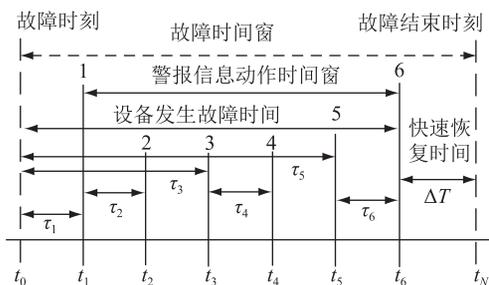


图4 某元件故障告警信息时序特性

Fig.4 Timing characteristics of component failure alarm information

图中,1代表主保护,2代表其对应的断路器;3代表近后备保护,4代表其对应的断路器;5代表远后备保护,6代表其对应的断路器; τ_1, τ_3, τ_5 分别为相对于故障时刻 t_0 的主保护、近后备保护和远后备保护动作的时间差; τ_2, τ_4, τ_6 分别为主保护、近后备保护和远后备保护对应的断路器跳开的时间差; ΔT 为快速恢复时间。

4 电网故障诊断 FTPN 建模

电网发生故障后,对应继电保护装置在预设整定原则下跳开相应断路器,形成一个或多个包含有故障元件的停电区域。以图5所示的新英格兰10机39节点系统为例,分别建立母线加权 FTPN、线路加权 FTPN 故障诊断模型。每条线路两端均配置了完善的主保护、近后备保护、远后备保护,每条母线配置了主保护、后备保护。

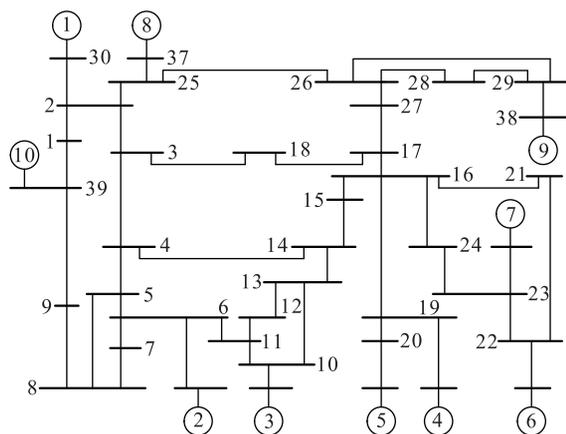


图5 新英格兰10机39节点系统

Fig.5 New England 10 machine 39 bus system

4.1 保护/断路器动作延时约束

设置了时间级差的保护动作先后顺序为:主保护最先动作;在满足近后备保护动作条件时,近后备保护动作在主保护之后动作;在满足远后备保护动作条件时,远后备保护在近后备保护之后动作。其相对于故障时的延时分别为 $\Delta T_{mr} = [\Delta\tau_{mr}^{\min}, \Delta\tau_{mr}^{\max}]$, $\Delta T_{pr} = [\Delta\tau_{pr}^{\min}, \Delta\tau_{pr}^{\max}]$ 和 $\Delta T_{sr} = [\Delta\tau_{sr}^{\min}, \Delta\tau_{sr}^{\max}]$;定义各类保护对应的断路器相对于保护动作时间的延时分别为 $\Delta T_{mc} = [\Delta\tau_{mc}^{\min}, \Delta\tau_{mc}^{\max}]$, $\Delta T_{pc} = [\Delta\tau_{pc}^{\min}, \Delta\tau_{pc}^{\max}]$ 和 $\Delta T_{sc} = [\Delta\tau_{sc}^{\min}, \Delta\tau_{sc}^{\max}]$ 。

4.2 母线加权 FTPN 故障诊断模型

针对母线建立加权 FTPN 故障诊断模型的总体思路为:先建立各连接线路的主保护、后备保护模型,再构建母线综合故障诊断模型。CB表示断路器,如 $CB_{(3)-18}$ 表示线路 L3-18 靠近母线 B3 侧的断路器;首字母 R 表示保护,末尾字母 m、p、s 分别表

示主保护、近后备保护、远后备保护,如 $R_{(3)-18p}$ 表示线路 L3-18 靠近母线 B3 侧的近后备保护。以图 5 中的母线 B14 为例, R_{B14m} 是其主保护,连接该母线的线路的远后备保护 $R_{(4)-14s}$ 、 $R_{(13)-14s}$ 和 $R_{(14)-15s}$ 构成了母线 B14 的后备保护,得到该母线的加权 FTPN 故障诊断综合模型如图 6 所示。

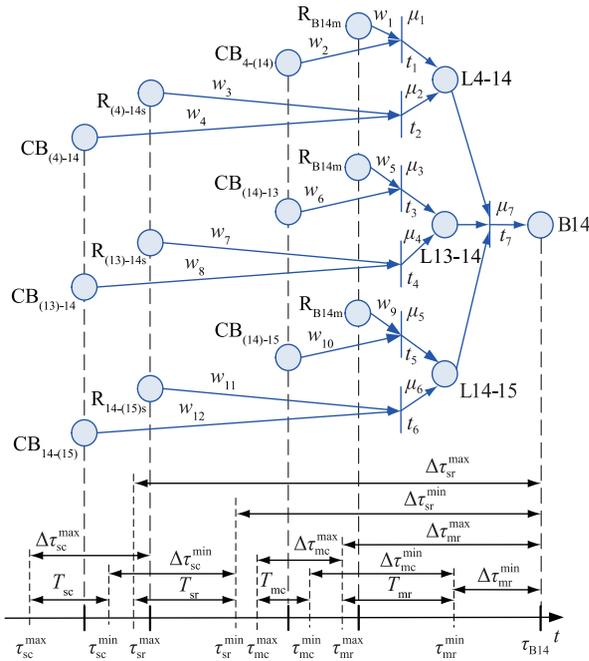


图 6 母线加权 FTPN 故障诊断
Fig.6 Fault diagnosis of bus weighted fuzzy timing Petri network

4.3 线路加权 FTPN 故障诊断模型

针对线路建立加权 FTPN 故障诊断模型的总体思路为:先建立其两端的各类保护模型,再构建线路综合故障诊断模型。以线路 L4-14 为例,其配置了 $R_{(4)-14m}$ 、 $R_{(4)-14m}$ 主保护, $R_{(4)-14p}$ 、 $R_{(4)-14p}$ 近后备保护以及 $R_{(3)-4s}$ 、 $R_{(4)-5s}$ 、 $R_{(13)-14s}$ 、 $R_{(14)-15s}$ 远后备保护,得到该线路的加权 FTPN 故障诊断综合模型如图 7 所示。图 7 中的库所 $p_i(i=1,2,\dots)$ 为过渡库所,无实际意义;若过渡库所为某变迁的输入库所,相应地该变迁为过渡变迁。

母线和线路加权 FTPN 故障诊断模型建立后,结合系统相关参数可对该系统进行故障诊断仿真。

5 加权 FTPN 故障诊断模型总体结构

利用简单故障信息源的传统电力系统故障诊断方法在应对简单故障时可较为迅速、准确地进行故障定位,实现故障类型识别等简单的故障诊断功能。但当系统复杂故障或数据传输错误、缺漏,断路器,保护装置拒作和误动以及其他不确定因素将导致故障诊断失效甚至给出错误结果^[17-20],该问题

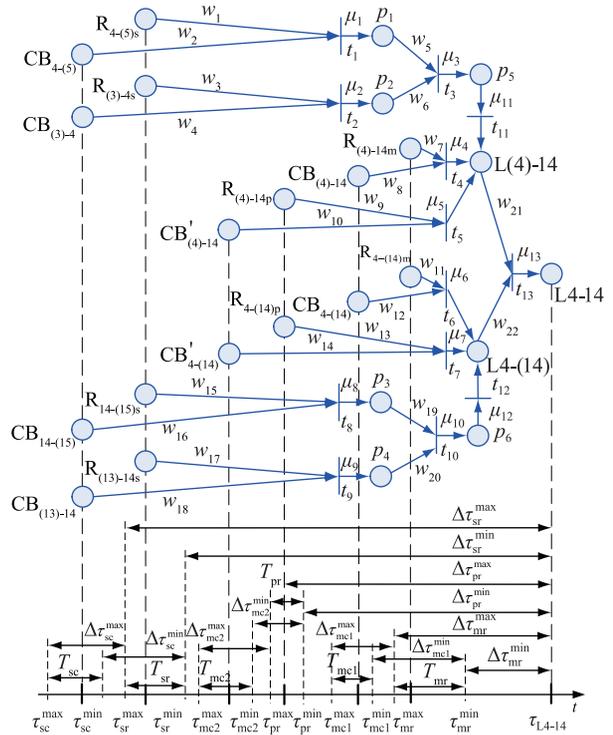


图 7 线路加权 FTPN 故障诊断建模
Fig.7 Fault diagnosis model of line weighted fuzzy timing Petri network

导致故障诊断系统的实用化程度不高。选择可以迅速传输到调控中心的故障信息和正确合适的诊断方法可以提高诊断的实时性和准确性,选择多种源数据进行校正,相互补充,提高冗余性,以反应更多的电网故障状态,有利于提升故障诊断的适应性和准确性。文中提出基于加权 FTPN 的分层高容错电网故障诊断模型,该诊断模型包含 4 个层次:(1) 进行停电区域搜索,确定可能的故障元件集;(2) 建立停电区域内各可能故障元件的加权 FTPN 故障诊断模型;(3) 进行代数矩阵推理计算,得到故障元件集;(4) 对保护/断路器的误动、拒动情况进行判定。具体结构如图 8 所示。

第一层,采用 BFS 算法,使用电网拓扑以及 SCADA/EMS 提供的遥信,确定停电区域。在停电区域只有一个元件的情况下,可直接得出故障元件就是这个元件的结论;除此情况,需对所有元件建立故障诊断模型。

第二层,根据网络拓扑数据、保护配置信息、保护和断路器动作逻辑规则建立停电区域内所有故障元件的故障诊断模型,再根据各元件间的拓扑关系进行融合。告警信息的不确定性和不完备性给大规模复杂系统诊断建模和诊断决策造成一定的困难。利用告警信息的时序属性,对告警进行校验,有助于故障的准确诊断和分析。

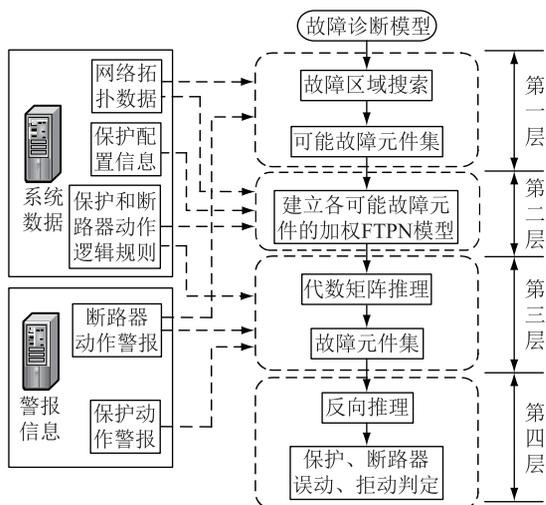


图8 基于加权 FTPN 的分层高容错电网故障诊断

Fig.8 Hierarchical fault diagnosis for grids based on weighted fuzzy timing Petri network

第三层,基于所发展的加权 FTPN 诊断模型,根据故障区域内故障元件与对应保护、断路器动作之间的逻辑关系,构建每个元件的加权 FPN,通过代数矩阵推理计算,得到故障元件集。采用 BFS,根据断路器动作信息、网络拓扑关系确定停电区域。若停电区域内有且仅有一个元件情况下,该元件即为故障元件;若停电区域内元件数大于等于 2,则需要对区域内所有元件分别建立加权 FPN 模型进行推理分析,而后判断故障元件。

第四层,根据诊断出的故障元件采取反向推理,设加权 FTPN 的推理过程处于稳定的网络状态,推导库所置信度矩阵 M ,从而对保护装置和断路器动作行为进行评价,以校核保护装置和断路器动作的正确性。

6 结语

文中介绍了加权 FPN 模型及其十一元组的数学定义、图形表示以及变迁时序约束,并分析了加权 FTPN 的推理过程。采用 BFS 算法,根据断路器动作信息、网络拓扑关系确定停电区域,得到可能故障元件。对停电区域内所有可能故障元件分别建立加权 FTPN 模型进行推理分析,进而判断故障元件。介绍了故障差错告警差错信息的分类以及故障告警信息时序特性;计及告警信息的时序特征、保护和断路器动作逻辑分别建立了母线和线路加权 FTPN 电网故障诊断模型,可对告警信息进行校核,具有较高的容错性。

参考文献:

[1] 谭风雷,张兆军,朱超,等.一种改进的指数平滑负荷预测方法研究[J].电力需求侧管理,2016,18(6):22-26.

TAN Fenglei, ZHANG Zhaojun, ZHU Chao, et al. Optimized exponential smoothing for load forecast [J]. Power Demand Side Management, 2016, 18(6): 22-26.

[2] 陈昊,万秋兰,王玉荣.基于厚尾均值广义自回归条件异方差族模型的短期风电功率预测[J].电工技术学报,2016,31(5):91-98.

CHEN Hao, WAN Qiulan, WANG Yurong. Short-term wind power forecast based on fat-tailed generalized autoregressive conditional heteroscedasticity-in-mean type models [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 91-98.

[3] 潘磊,李斌,杨光,等.交流系统故障时统一潮流控制器处理策略[J].电力工程技术,2017,36(6):132-137.

PAN Lei, LI Bin, YANG Guang, et al. Control and protection strategies of unified power flow controller during AC system failure [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6): 132-137.

[4] 王小华,荣命哲,吴翊,等.高压开关故障诊断专家系统中快速诊断及新知识获取方法[J].中国电机工程学报,2007,27(3):95-99.

WANG Xiaohua, RONG Minzhe, WU Yi, et al. High speed switch fault diagnosis expert system fast diagnosis and new knowledge acquisition methods [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(3): 95-99.

[5] PROTOPAPAS C A, PSALTIRAS K P, MACHIAS A V. An expert system for fault diagnosis and alarm processing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(2): 648-655.

[6] 高曙,江北,顾雪平,等.电力系统事故判断专家系统的研究[J].电力系统及其自动化学报,1992,4(2):51-59.

GAO Shu, JIANG Bei, GU Xueping, et al. Research on expert system of power system accident judgment [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 1992, 4(2): 51-59.

[7] 翁汉琨,毛鹏,林湘宁.一种改进的电网故障诊断优化模型[J].电力系统自动化,2007,31(7):66-70.

WENG Hanli, MAO Peng, LIN Xiangning. An improved model for optimizing power system fault diagnosis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 66-70.

[8] 朱玲,王建锋,时维俊.基于变流器网侧电流的双馈风力发电机转子绕组故障诊断[J].江苏电机工程,2016,35(3):76-79.

ZHU Ling, WANG Jianfeng, SHI Weijun. Double-fed induction generator rotor fault diagnosis based on grid-side current of back-to-back converter [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(3): 76-79.

[9] 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):246-251.

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): 246-251.

[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] 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): 74-79.
SUN Jing, QIN Shiyin, SONG Yonghua. Application of fuzzy Petri net in power system fault diagnosis[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 74-79.
- [12] 杨健雄, 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.
- [13] 吴文可. 电力系统故障诊断模型与事故处理辅助决策方法[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
WU Wenke. Power system fault diagnosis model and accident decision auxiliary decision method [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [14] 吴文可, 文福拴, 薛禹胜, 等. 基于多源信息的延时约束加权模糊 Petri 网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(24): 43-53.
WU Wenke, WEN Fushuan, XUE Yusheng. Time delay constraint weighted fuzzy Petri nets fault diagnosis model based on multi-source information [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(24): 43-53.
- [15] 杨春发. 基于 Petri 网的电网故障诊断方法的研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2004.
YANG Chunfa. Research on power network fault diagnosis based on Petri net[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2004.
- [16] 吴奕, 吴望冰, 朱海兵, 等. 利用多源信息的配电系统故障诊断 Petri 网模型[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2014, 41(6): 7-13.
WU Yi, WU Wangbin, ZHU Haibing, et al. Power system fault diagnosis Petri nets model using multi-source information [J]. Journal of North China Electric Power University(Natural Science Edition), 2014, 41(6): 7-13.
- [17] 陈昊, 邓广静, 王玉荣, 等. 电抗器间隔断路器后置式接线所引起二次问题研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(18): 122-126.
CHEN Hao, DENG Guangjing, WANG Yurong, et al. Research on the secondary side problem caused by breaker rear-wiring pattern in reactor interval[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(18): 122-126.
- [18] 杨舟, 陈俊, 唐利涛, 等. 基于模糊 FMEA 分析的系统自动故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 140-145.
YANG Zhou, CHEN Jun, TANG Litao, et al. Automatic fault diagnosis analysis method of system FMEA based on fuzzy theory[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 140-145.
- [19] 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.
- [20] 谭风雷. 模块化多电平换流器 2N+1 电平调制方式研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 99-103.
TAN Fenglei. Research on 2N+1 level modulation method of modular multilevel converter [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 99-103.

作者简介:



戢李刚

戢李刚(1980),男,硕士,高级政工师、高级技师,从事电网运行管理工作(E-mail: 952447185@qq.com);

陈昊(1980),男,博士,研究员级高级工程师,从事电力系统保护与控制工作;

谭风雷(1989),男,硕士,工程师,从事电力电子技术在电力系统中的应用工作。

A model of fault diagnosis for power system based on time sequence fuzzy Petri net

Ji Ligang¹, CHEN Hao², TAN Fenglei²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Maintenance Brach Company, Nanjing 211106, China)

Abstract: A model of fault diagnosis for power system based on time sequence fuzzy Petri net is proposed, which mainly includes identifying blackout area, modeling for time sequence fuzzy Petri net of possible faulty components, solving faulty component set and judging operation information of protection and circuit breakers. Fault alarm error information classification and fault alarm information timing characteristics are introduced. Based on the study of operation information of circuit breakers and network topology, the method for identifying blackout area is given with BFS. Finally, take New England 10 machine 39 node system as an example, mathematical models of fault diagnosis for power lines and bus on time sequence fuzzy Petri net are established, and the overall structure of this system is given, results show that it can rapidly locate fault, and accurately give operation information of protection and circuit breakers.

Keywords: power system fault; intelligent diagnosis; Petri net; blackout area; time constraint

(编辑 方晶)