

一种基于 Petri 网和概率信息的电力系统故障诊断方法

孙 静¹, 秦世引¹, 宋永华²

(1. 北京航空航天大学宇航学院, 北京市 100083; 2. Brunel 大学, 英国)

摘要:提出了一种基于 Petri 网和概率信息的面向电力系统故障诊断问题的建模和诊断分析方法。逻辑检验和实例仿真证实了所给出的方法的可行性和有效性,并符合工程实用性要求,可在电力系统紧急控制等方面发挥技术支持作用。

关键词:故障诊断; Petri 网; 电力系统; 概率信息

中图分类号: TM711; TP206.3

0 引言

电力系统故障诊断,就是利用继电保护和断路器的动作信息识别故障元件或故障区域。到目前为止,国内外在故障诊断方面越来越多地采用了计算智能和知识工程的工具与方法,如基于专家系统^[1]、人工神经网络^[1]、遗传算法^[2~5]及模糊逻辑的诊断识别方法等。这些方法各有其特点,在电力系统故障诊断方面都有一定的理论研究和实际应用基础,但大都处在一种面向简单系统的分析与推断的基础上,而当问题变得复杂时,就会遇到很多困难。

在实际系统中,一些像噪声和信息丢失等不确定性因素常常会导致不准确的诊断结果。此外,大多数的常规故障诊断系统都是基于二进制逻辑的判断方法,不能有效地处理那些复杂的不确定性问题。文献[6]提出了一种基于概率信息进行故障诊断的新方法,用于处理在故障诊断中有关继电保护和断路器动作的不确定性问题。其优点在于,能够在收集到带有大量不确定性因素的信息的情况下进行有效的故障诊断。

以 Petri 网为工具能有效地实现故障诊断系统的模型化,以图形方式描述系统的功能关系和办理流程,从而使那些复杂的逻辑关系形象化,便于分析和理解。在国外已有一些研究人员把 Petri 网用于电力系统故障诊断^[7,8];在国内,对于 Petri 网应用于故障诊断方面也有一定的研究^[9~12]。但是,无论是国外或国内,Petri 网在电力系统故障诊断方面的实际应用研究还处在一个探索阶段,没有形成成熟的理论体系和有效的技术实现途径。已有的文献大都是关于局部电力系统故障诊断方面的探索性研

究^[11,12],并且都基于采集到了继电器和断路器的正确动作信息的假设,尚不能在故障信息不确定的条件下进行有效的诊断。

本文在运用 Petri 网进行建模的同时,也利用概率信息来处理电力系统故障诊断中不确定性因素的问题,进而研究如何对电力系统全网进行有效的故障诊断等问题,并提出了相应的算法。通过数字仿真实验证明了其有效性和可行性,可为后续研究电力系统紧急控制问题提供技术支持和工程实现途径。逻辑分析和实例仿真表明,本文所提出的方法达到了满意的判断效果,而且更为简捷,易于推广应用。

1 Petri 网

Petri 网是一种可以用图形表示的组合模型,同时又是严格定义的数学对象,所以,借助于数学工具开发的 Petri 网分析方法和技术,既可以用于静态结构分析,又能用于动态的行为分析。此外,Petri 网以图形方式描述系统,可使系统的复杂逻辑关系形象化,便于理解;并可以通过变迁发生的机制描述系统内部的并发性、竞争性。

1.1 具有概率信息测度的 Petri 网模型

定义 1 三元组 $\Sigma=(P,T,F)$ 满足以下条件就称为有向网^[13]:① $P \cup T \neq \emptyset$;② $P \cap T = \emptyset$;③ $F \subseteq P \times T \cup T \times P$ 。其中: $P=\{p_1,p_2,\cdots,p_n\}$ 称为 Σ 的有限位置集; $T=\{t_1,t_2,\cdots,t_m\}$ 称为 Σ 的有限变迁集; F 称为流关系; $\emptyset$ 表示空集。

对于 $x \in X$,称 $x^{\text{pre}}=\{y|(y,x) \in F\}$ 为 x 的前集; $x^{\text{post}}=\{y|(x,y) \in F\}$ 为 x 的后集。下述 $t^{\text{pre}}, t^{\text{post}}, p^{\text{pre}}, p^{\text{post}}$ 的含义与此相同。

定义 2 八元组 $N=(P,T,F,W,M_0,f,P_p,P_r)$ 构成一个具有概率信息测度的 Petri 网的充要条件是:① $\Sigma=(P,T,F)$ 是一个有向网,称为 N 的基网;② W,M_0 分别是 Σ 上的权函数和初始标识,

收稿日期: 2003-04-02。
国家重点基础研究专项经费资助项目(G1998020310);国家自然科学基金资助项目(60074024)。

$W(x, y)$ 表示弧 (x, y) 的权值, 若 $(x, y) \notin F$, 定义 $W(x, y) = 0$, 若在 Petri 网中未标出具体值, 则 $W(x, y) = 1$ (1 为默认值); ③ f 为变迁发生概率的计算函数; ④ $P_p = [p(p_1), p(p_2), \dots, p(p_n)]$ 和 $P_t = [p(t_1), p(t_2), \dots, p(t_m)]$ 分别为同位置集合、变迁集合相对应的状态概率向量。

变迁 t_i 上的状态概率值和 t_i 的前集 t_i^{pre} 中各个位置的状态概率值密切相关, 由函数 $f(\cdot)$ 所决定, 在此我们定义:

$$p(t_i) = f(t_i) = \frac{\sum_{j=1}^h p(p_j)}{h}$$

式中: h 为满足 $\forall p_j \in P$ 和 $p_j \in t_i^{\text{pre}}$ 条件的位置子集中的元素个数; $p(t_i)$ 和 $p(p_j)$ 分别为 t_i 和 p_j 上的状态概率值。

位置 p_j 上的状态概率值可由下式求得:

$$p(p_j) = \max_k [p(t_k)] \quad t_k \in p_j^{\text{pre}}$$

定义 3 给定一个 Petri 网 N 及标识 M , 则:

① 称 $t \in T$ 在 M 下使能(enable), 若满足 $\forall p \in t^{\text{pre}}, M(p) \geq W(p, t)$, 则在此模型中, 变迁即可触发; ② t 引发后产生新的标识 M' , 称 M' 为 M 的后继标识:

$$M'(p) = \begin{cases} M(p) - W(p, t) & p \in t^{\text{pre}} - t^{\text{post}} \\ M(p) + W(t, p) & p \in t^{\text{post}} - t^{\text{pre}} \\ M(p) - W(p, t) + W(t, p) & p \in t^{\text{pre}} \cap t^{\text{post}} \\ M(p) & p \notin t^{\text{pre}} \cap t^{\text{post}} \end{cases}$$

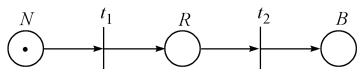
式中: $p \in t^{\text{pre}} - t^{\text{post}}$ 表示 $p \in t^{\text{pre}}$, 且 $p \notin t^{\text{post}}$; $p \in t^{\text{post}} - t^{\text{pre}}$ 表示 $p \in t^{\text{post}}$, 且 $p \notin t^{\text{pre}}$ 。

用 $M[t > M']$ 表示由 M 引发 t 而导致 M' , t 在 M 有发生权记为 $M[t >]$ 。如果 σ 表示一个变迁引发序列, 则由 M 经 σ 而 M' 记为 $M[\sigma > M']^{[13]}$ 。

上述 3 个定义给出了具有概率信息测度的 Petri 网模型。

1.2 Petri 网的图模型

图 1 所示为一个继电保护动作的简单 Petri 网模型。



N 为故障元件; R 为继电保护; B 为断路器

图 1 继电保护动作的 Petri 网模型

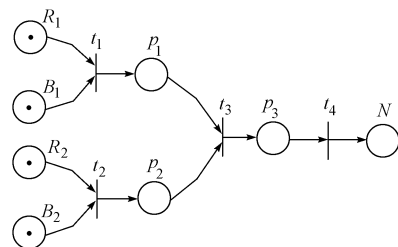
Fig. 1 Petri net model of relay protection

位置集 P 用圆圈表示, 分别为 N, R 和 B 。每个位置的小黑点数或数字表示该位置的标识数, 代表某种物质资源或信息资源^[14,15]; 每个位置的标识数的最大值是有所规定的, 图 1 中 N, R 和 B 的最大标识数规定为 1。变迁集合有 t_1 和 t_2 , 用“|”表示。

由 p 到 t (例如图 1 中由 N 到 t_1) 的有向弧称为输入弧; 由 t 到 p (例如图 1 中由 t_1 到 R) 的有向弧称为输出弧。输入弧和输出弧上标有权值, 分别为 $W(p, t)$ 和 $W(t, p)$, 权值为 1 时可省略不标。图 1 中 $W(N, t_1), W(t_1, R), W(R, t_2), W(t_2, B)$ 均为 1, 故不标。只要变迁输入位置中的标识数不小于变迁输入弧的 $W(p, t)$, 变迁即发生。变迁发生后, 输入位置的标识数减少 $W(p, t)$ 个, 输出位置则增加 $W(t, p)$ 个标识数。

图 1 中 N 的标识数为 1, 其值等于 $W(N, t_1)$, 表示 t_1 可触发; N 的标识数减少 1, 为 0, R 得到 $W(t_1, R)$ 个标识数 (为 1), 于是 t_2 可触发; 最后, B 的标识数为 1, 表示断路器跳开。可见, 此 Petri 网的触发过程与继电保护动作的机理相吻合。故以 Petri 网为工具, 通过检测到的继电保护和断路器的动作信息, 建立电力系统的故障诊断模型是可行而贴切的。

图 2 给出了一个简单故障 (如 1 条线路发生了故障) 的故障诊断的 Petri 网模型。



N 为故障元件; R_i 为继电保护; B_i 为断路器; p_i 为过渡位置

图 2 故障诊断的 Petri 网模型

Fig. 2 Model of fault diagnosis described by Petri net

图 2 中, 位置 R_1, R_2, B_1, B_2 分别为线路两端的主保护和相对应的断路器, 位置 N 为线路。如果从系统中检测到 R_1, R_2, B_1, B_2 动作, 则对应位置上的标识数为 1; 并且, 由于保护和断路器动作的不确定性, 若设对应位置上的不确定性概率值分别为 0.90, 0.95, 0.90, 0.95, 则其他位置 (p_i 和 N) 上的初始标识和概率值均为 0。

这个模型的演化计算过程为: 继电保护 R_i 和断路器 B_i 所对应的初始标识数为 1, 概率值为 0.90, 0.95; t_1, t_2 被触发; 由前面定义的变迁概率计算可知, 对应的变迁概率值均为 0.925, 此时位置 p_1, p_2 的标识数为 1; 由位置概率值的计算公式得 p_1, p_2 的概率值为 0.925, 于是 t_3 被触发, 其概率值为 0.9125; 位置 p_3 的标识数为 1, 且概率值为 0.9125, 于是 t_4 被触发, 其概率值也为 0.9125, 所以 N 的标识数变为 1, 其对应的概率值为 0.9125, 说明 N 发生故障的概率为 0.9125。

2 基于概率信息和 Petri 网的故障诊断系统模型

图 3 为电力系统继电保护和动作原理的局部示意图^[2],其中包含了 28 个元件、84 个保护和 40 个

断路器。本文以 Petri 网为工具,针对图 3 所示的继电保护系统,对 7 种有保护或断路器误动作的复杂情况进行深入分析,建立了基于概率信息和 Petri 网的故障诊断模型,并进行了仿真验证。

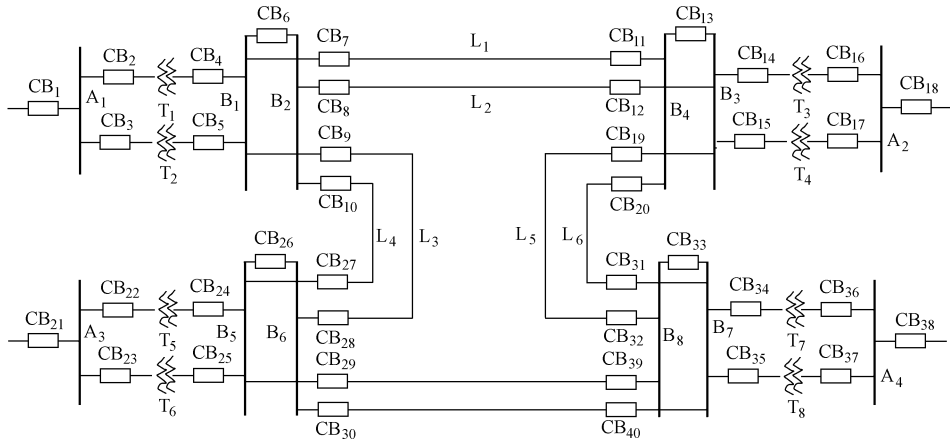


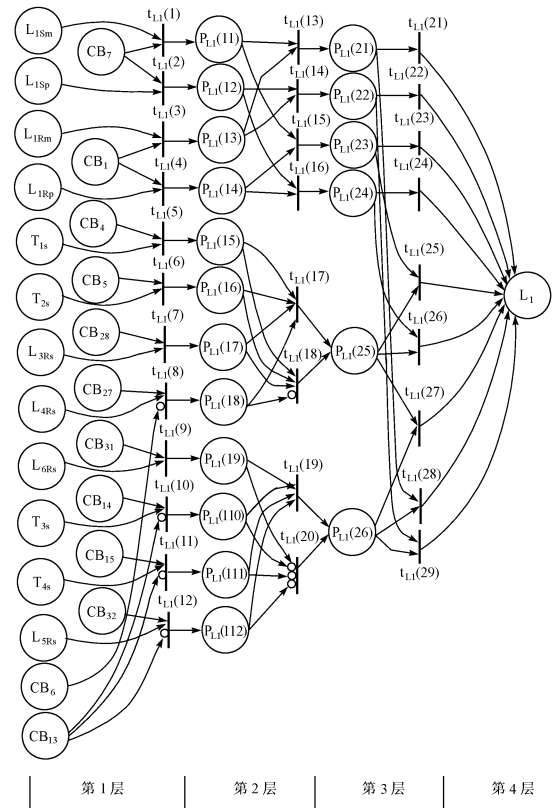
图 3 电力系统继电保护的局部示意图
Fig. 3 Diagram of protection in part of power system

图 3 中的 28 个元件依次为 $A_1 \sim A_4, T_1 \sim T_8, B_1 \sim B_8, L_1 \sim L_8$ 。40 个断路器依次为 $CB_1 \sim CB_{40}$ 。84 个保护中,36 个主保护依次为 $A_{1m} \sim A_{4m}, T_{1m} \sim T_{8m}, B_{1m} \sim B_{8m}, L_{1Sm} \sim L_{8Sm}, L_{1Rm} \sim L_{8Rm}$; 48 个后备保护依次为 $T_{1p} \sim T_{8p}, T_{1s} \sim T_{8s}, L_{1Sp} \sim L_{8Sp}, L_{1Rp} \sim L_{8Rp}, L_{1Ss} \sim L_{8Ss}, L_{1Rs} \sim L_{8Rs}$ 。

具体的保护动作次序和规范可参见文献^[2]。
在实际运行过程中,电力系统的保护和断路器包含来自多方面的不确定性因素。所以,适当地引入概率方法进行故障分析与诊断是一条有效的途径。借助 Petri 网独特的图形描述和并行推理功能,把电力系统的继电保护和断路器用带有标识位置/变迁(P/T)的 Petri 网来建模,并结合相关的概率信息,构成一种新的故障诊断工具。这样可使数学模型形象化,使分析和推断更为简便。

图 4 为用于图 3 中线路 L_1 故障诊断的 Petri 网模型,图 3 中其他元件的模型可依此类推得到。

在 Petri 网模型中,位置元是由输电线、变压器、母线、继电器和断路器以及中间过渡位置等组成。为了区分系统元件位置和过渡位置,图 4 中没有把位置用统一的符号来描述,即第 1 层和最后一层的位置都是用与图 3 中元件所对应的符号来表示,而中间过渡位置则用一个序列 $p_{Li}(i)$ 来表示。变迁元是由故障变迁(继电保护)和动作标记组成建模的依据是融合了 Petri 网模型化结构、概率信息和故障发生后元件动作响应关系的先验知识。



S和R分别表示线路的送端和受端; m, p和s 分别表示主保护、第1后备保护和第2后备保护

图 4 针对线路 L_1 所建立的含有概率信息的 Petri 网故障诊断模型
Fig. 4 Fault diagnosis model of Petri net with probability information for line L_1

在图 4 中用 Petri 网可以把这些元件的故障诊断过程以形象化的、易于理解的、反映知识推理关系的图形模型描述出来。由于利用矩阵运算和并行触发特性能够使计算过程更为便捷,因而可以保证诊断速度的快速性。这样,对应于图 3 中的系统元件共有 28 个诊断模型。事实上,与图 3 相对应的 Petri 网诊断模型是一个交织互联的并行网模型,各个系统元件的诊断流程具有相对独立性,本文为了推理和分析方便,以系统元件为单位分别建立故障诊断模型。

图 3 中母线 A_1 左边未示出部分的第 2 后备保护和断路器,在后面的验证中均能准确无误地动作。图 4 给出的继电保护和断路器的动作规范可能与实际应用中的具体规定不一致,这里只是为了说明该方法原理的一个示例。

在此模型中有 3 个节点集合:集 1 为输电线、变压器或母线集合;集 2 为继电器集合;集 3 为断路器集合。图 4 给出了故障发生时,由箭头线表示的继电器和断路器因果关系的互动操作。考虑到继电器和断路器的动作不确定性特点及其动作优先权,对于主保护(是线路最明显、最直接的保护),赋予其概率值为 0.90;第 1 后备保护和第 2 后备保护的概率值分别设为 0.80 和 0.70;而与继电器相比,断路器动作的可靠性要高一些,与之相对应的断路器的不确定性概率值要高出 0.05^[16]。故在图 4 中,第 1 层所对应的位置的初始概率值为:主保护和相应断路器的位置概率值分别为 0.90 和 0.95;第 1 后备保护和相应断路器的位置概率值分别为 0.80 和 0.85;第 2 后备保护和相应断路器的位置概率值分别为 0.70 和 0.75。第 2 层、第 3 层和第 4 层的位置上的初始概率值均为 0。

3 逻辑检验

考虑到故障设备的因果操作关系,可以判断故障段诊断得是否准确。在集 1 中的节点故障造成连接权最大的集 2 中的节点动作,使得与集 2 连接的集 3 中的节点也动作。如果具有最大权值的集 2 中的节点不动作,则具有第 2 大权值的集 2 中的节点动作,从而导致集 3 中的节点动作。如果这个操作也失败的话,连有禁止环的集 2 的节点将动作,并导致连接此集 2 节点的集 3 中的节点动作。故障诊断的过程则与此动作流程相反。

下面用一个例子来具体说明。例如:系统检测到保护 L_{1Sp} , L_{1Rm} 动作和断路器 CB_7 , CB_{11} 跳闸的信号。根据 L_{1Sp} , L_{1Rm} , CB_7 , CB_{11} 动作,它们相应位置

的标识数为 1,而与它们相对应的概率值分别为 0.80, 0.90, 0.85 和 0.95。由图 4 可知, $t_{L1}(2)$, $t_{L1}(3)$ 被触发,由计算函数 $f(\cdot)$ 得到其状态概率值分别为 $f(0.80, 0.85) = (0.80 + 0.85)/2 = 0.825$ 和 $f(0.90, 0.95) = (0.90 + 0.95)/2 = 0.925$, 因而 $P_{L1}(12)$, $P_{L1}(13)$ 的标识数为 1,其状态概率值分别为 0.825 和 0.925;接着 $t_{L1}(14)$ 被触发,与其相对应的状态概率值为 $f(0.825, 0.925) = (0.825 + 0.925)/2 = 0.875$, 因而 $P_{L1}(22)$ 的标识数为 1,其状态概率值为 0.875;然后 $t_{L1}(22)$ 被触发, f 值为 0.875,其对应的状态概率值为 0.875,所以 L_1 的标识数为 1,状态概率值为 0.875。由此,可以判定 L_1 发生了故障,且故障的概率值为 0.875。

应用以上一些规则,也可以对故障段进行“误动作”或“误报警”方面的诊断。例如,在上面的例子中,如果同时又检测到 L_{1Rp} 动作,则其初始标识数为 1,状态概率值为 0.80,相应的断路器的状态概率值为 0.85。同时由推理过程导出 $t_{L1}(4)$ 也被触发,其状态概率值为 0.825;故 $P_{L1}(14)$ 中的标识数为 1,状态概率值为 0.825;接着 $t_{L1}(16)$ 被触发,其状态概率值为 0.812 5,因而 $P_{L1}(24)$ 的标识数和状态概率值分别为 1 和 0.812 5;然后 $t_{L1}(24)$ 被触发,其状态概率值为 0.812 5;从而 L_1 的标识数为 2,且状态概率值为 0.875 和 0.812 5。以状态概率值取大的标准来判断,即 L_{1Rp} 误动或误报警。如果不采用概率决策方法的话,此处就会导致在同一个故障元件中出现 2 个或 2 个以上的标识数,这在推理上正确,但与实际情况相悖。

从以上的分析过程可知,通过判断故障段(即集 1)的位置标识数及相应的状态概率值,即可诊断出是否发生故障及故障的概率值。类似地,也可通过其他段的位置标识数及相应的概率值来判断故障的发生及其概率值。这样的模型不仅可以检测单个故障,也可以检测多重故障情况,如果同时推出 2 个或 2 个以上的集 1 节点的标识数不为 0,则可判断该系统发生多重故障。

4 实例仿真

为了检验本文所提出的方法的有效性,并且考虑到所用例子的典型性,根据图 3 所示的一个电力系统保护的局部示意图,并且利用其中所给的数据对本文提出的建模和诊断分析方法进行仿真验证。仿真诊断结果如表 1 所示。可以看出,本文提出的故障诊断系统的建模和诊断决策方法是有效的。

表 1 图 3 所示系统的部分测试结果
Table 1 Part of test results of power system in Fig. 3

测试组号	故障信号	诊断结果
1	保护 B _{1m} , L _{2Rs} , L _{4Rs} 动作, 断路器 CB ₄ , CB ₅ , CB ₇ , CB ₉ , CB ₁₂ , CB ₂₇ 跳闸	B ₁ 故障, 概率值为 0.858
2	保护 B _{1m} , L _{1Sp} , L _{1Rm} 动作, 断路器 CB ₄ , CB ₅ , CB ₆ , CB ₇ , CB ₉ , CB ₁₁ 跳闸	B ₁ 和 L ₁ 故障, 概率值分别为 0.925 和 0.875
3	保护 B _{1m} , B _{2m} , L _{1Sm} , L _{1Rp} , L _{2Sp} , L _{2Rm} 动作, 断路器 CB ₄ , CB ₅ , CB ₆ , CB ₇ , CB ₈ , CB ₉ , CB ₁₀ , CB ₁₁ , CB ₁₂ 跳闸	B ₁ , B ₂ 和 L ₁ , L ₂ 故障, 概率值分别为 0.925, 0.925, 0.875 和 0.875
4	保护 T _{3p} , L _{7Sp} , L _{7Rp} 动作, 断路器 CB ₁₄ , CB ₁₆ , CB ₂₉ , CB ₃₉ 跳闸	T ₃ , L ₇ 故障, 概率值分别为 0.825, 0.825
5	保护 T _{5s} , T _{6s} 动作, 断路器 CB ₂₂ , CB ₂₃ , CB ₂₄ , CB ₂₅ 跳闸	A ₃ 故障, 概率值为 0.725, 并且 CB ₂₄ , CB ₂₅ 误动作或误报警
6	保护 T _{7m} , T _{8p} , B _{7m} , B _{8m} , L _{5Sm} , L _{5Rp} , L _{6Ss} , L _{7Sp} , L _{7Rm} , L _{8Ss} 动作, 断路器 CB ₁₉ , CB ₂₀ , CB ₂₉ , CB ₃₀ , CB ₃₂ , CB ₃₃ , CB ₃₄ , CB ₃₅ , CB ₃₆ , CB ₃₇ , CB ₃₉ 跳闸	L ₅ , L ₇ , B ₇ , B ₈ , T ₇ , T ₈ 故障, 概率值分别为 0.875, 0.875, 0.858, 0.925, 0.925 和 0.825
7	保护 L _{1Sm} , L _{1Rp} , L _{2Sp} , L _{2Rp} , L _{7Sp} , L _{7Rm} , L _{8Sm} , L _{8Rm} 动作, 断路器 CB ₇ , CB ₈ , CB ₁₁ , CB ₁₂ , CB ₂₉ , CB ₃₀ , CB ₃₉ , CB ₄₀ 跳闸	L ₁ , L ₂ , L ₇ , L ₈ 故障, 概率值分别为 0.875, 0.825, 0.875 和 0.925

5 结语

本文针对电力系统故障诊断问题的特点,以 Petri 网为工具,并结合概率信息加权表示方法,提出了建模和诊断分析的决策方法。为考核其可行性和有效性,在进行逻辑检验的同时,选取典型算例进行了仿真验证。仿真结果表明,本文所提出的建模和诊断方法在精确性和可靠性方面完全符合工程实用化要求,不但方法简单、速度快,而且能以故障概率信息值的形式为操作人员提供有用的启发式信息。

参考文献

1 顾雪平,盛四清,张文勤,等 (Gu Xueping, Sheng Siqing, Zhang Wenqin, et al). 电力系统故障诊断神经网络专家系统的一种实现方式 (An Approach to Expert Systems with Artificial Neural Networks for Power System Fault Diagnosis). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 1995, 19(9): 26~29

2 文福拴,韩祯祥 (Wen Fushuan, Han Zhenxiang). 基于遗传算法和模拟退火算法的电力系统的故障诊断 (Fault Section Estimation in Power Systems Using Genetic Algorithm and Simulated Annealing). 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 1994, 14(3): 29~35

3 文福拴,韩祯祥,田磊,等 (Wen Fushuan, Han Zhenxiang, Tian Lei, et al). 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法 第一部分:模型与方法 (An Analytic Model and Genetic Algorithm Based Method for Fault Diagnosis in Power Systems Part 1: The Model and Method). 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the EPSA), 1998, 10(3): 1~7

4 文福拴,韩祯祥,田磊,等 (Wen Fushuan, Han Zhenxiang, Tian Lei, et al). 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法 第二部分:软件实现 (An Analytic Model and Genetic Algorithm Based Method for Fault Diagnosis in Power Systems Part 2: The Software Implementation). 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the EPSA), 1998, 10(3): 8~14

5 文福拴,韩祯祥,田磊,等 (Wen Fushuan, Han Zhenxiang, Tian Lei, et al). 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法 第三部分:浙江电力系统 EMS 信息获取与测试结果 (An Analytic Model and Genetic Algorithm Based Method for Fault Diagnosis in Power Systems Part 3: The EMS Data Acquisition Method and Test Results for Zhejiang Provincial Power System). 电力系统及其自动化学报 (Proceedings of the EPSA), 1999, 11(1): 13~18

6 Wen F S, Chang C S. Probabilistic Approach for Fault Section Estimation in Power Systems Based on a Refined Genetic Algorithm. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144(2): 160~168

7 Lo K L, Ng H S, Grant D M, et al. Extended Petri Net Models for Fault Diagnosis for Substation Automation. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 1999, 146(3): 229~234

8 Hadjicostis C N, Verghese G C. Power System Monitoring Using Petri Net Embeddings. IEE Proceedings—Generation, Transmission and Distribution, 2000, 147(5): 299~303

9 赵洪山,米增强,杨奇逊 (Zhao Hongshan, Mi Zengqiang, Yang Qixun). 基于冗余嵌入 Petri 网技术的变电站故障诊断 (Substation Fault Diagnosis Based on Petri Nets Embedding). 电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems), 2002, 25(4): 32~35

10 玄志成,陈章位,黄克强,等 (Xun Zhicheng, Chen Zhangwei, Huang Keqiang, et al). 基于 Petri 网的复合故障诊断方法的研究 (Research on Compound Fault Diagnosis Method Based on Petri Nets). 机械科学与技术 (Mechanical Science and Technology), 1999, 18(2): 291~293

11 黄晓光,高梅梅,王永泓,等 (Huang Xiaoguang, Gao Meimei, Wang Yonghong, et al). 基于模糊 Petri 网的知识表示方法在燃气轮机故障诊断专家系统中的应用 (Application of Fuzzy Petri Net Knowledge Representation in Fault Diagnosis Expert System of Gas Turbine). 动力工程 (Power Engineering), 2000, 20(5): 872~875

12 李日龙,李雄刚 (Li Rilong, Li Xionggang). 利用 Petri 网对电力系统进行故障诊断 (Using Petri Nets for Diagnosis of Power System Fault). 华中电力 (Central China Electrical Power), 2000, 13(1): 1~4

13 田国会,李晓磊,杨西侠 (Tian Guohui, Li Xiaolei, Yang Xixia). Petri 网方法及其在离散事件动态系统研究中的应用 (Petri Nets and Their Application on Discrete Event Dynamical Systems). 山东工业大学学报 (Journal of Shandong University of Technology), 2000, 30(4): 322~329

(上接第 14 页 continued from page14)

- 14 Janneck J W, Naedele M. Introducing Design Patterns for Petri Nets. TIK-Report No. 39, 1998
- 15 Ferscha A. Tutorial on Parallel and Distributed Simulation of Petri Nets. Performance Tolls' 95, Heidelberg (Germany): 1995
- 16 Cho H J, Park J K. An Expert System for Fault Section Diagnosis of Power Systems Using Fuzzy Relations. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(1): 342~348

系统的综合集成建模与智能优化控制。E-mail: zjisun@yeah.net

秦世引(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事智能控制与模式识别、混杂控制系统理论及其应用、复杂系统与复杂性科学等方面的研究工作。E-mail: qsy@buaa.edu.cn

宋永华(1964—),男,博士,教授,博士生导师,英国皇家工程院特聘教授,主要从事电力系统的建模、仿真、故障诊断、优化控制与调度决策等方面的研究工作。

孙 静(1975—),女,博士研究生,研究方向为混杂电力

A FAULT DIAGNOSIS METHOD FOR POWER SYSTEMS BASED ON PETRI NETS AND PROBABILITY INFORMATION

Sun Jing¹, Qin Shiyin¹, Song Yonghua²

(1. Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

(2. Brunel University, Uxbridge, Middlesex, UB8 3PH, UK)

Abstract: A fault diagnosis method for power systems based on Petri nets and probability information is presented, which includes the modeling of fault diagnosis system and the decision-making technique of diagnosis analysis. The feasibility and effectiveness of the proposed approach are demonstrated by logic verification and simulation. Moreover, this method can also meet the requirement of engineering application and provide technical support for the implementation of emergency control of EPS.

This project is supported by National Key Basic Research Special Fund of China (No. G1998020310) and National Natural Science Foundation of China (No. 60074024) .

Key words: fault diagnosis; Petri nets; power systems; probability information