

计及报警信息逻辑关联的改进模糊Petri网故障诊断模型

为有效辨识不完备及不确定的保护和断路器动作信息，提高输电网故障诊断的准确性和快速性，研究了一种计及报警信息逻辑关联的改进模糊Petri网故障诊断模型。首先充分考虑了报警信息中保护动作和断路器跳闸的逻辑关联特性，提出了改进模糊Petri网的基本定义和模糊推理方法；然后建立了基于改进模糊Petri网的输电网故障诊断模型；最后通过某局部电力系统验证了模型的有效性和容错性。

白展 苗世洪/华中科技大学电气与电子工程学院 孙雁斌 陈亦平/中国南方电网有限责任公司 侯云鹤/香港大学电机电子工程系



白展/硕士研究生

关键词/Keywords

逻辑关联 ·
改进模糊Petri网 ·
输电网故障诊断 ·
不完备性 ·
不确定性 ·

迄今为止，国内外在输电网故障诊断领域开展了大量的研究工作，并提出了一系列智能诊断方法，如专家系统^[1]、遗传算法^[2]、人工神经网络^[3]、优化技术^[4]、模糊集理论^[5]和Petri网^[6]等。其中，Petri网因推理简单、结构清晰以及具有并行处理性、快速性等优点，受到电力学者的广泛青睐。

尽管Petri网具备上述优点，但无法有效应对报警信息的不完备性和不确定性，为此，一些学者提出了“模糊Petri网”的概念。文献[7-8]运用概率信息测度理论，赋予保护和断路器动作可信度，然后对电网各元件建立模糊Petri网模型，并考虑了报警信息的不确定性对诊断结果准确性的影响；文献[9]提出了模糊推理Petri网故障诊断方法，通过定义两种推理算子，利用矩阵运算实现了输电网的故障诊断；文献[10-11]研究了保护和断路器动作信息对故障诊断的不同影响程度，利用加权模糊Petri网完成

输电网的故障诊断推理过程，提高了模型的容错性。

基于上述研究，本文提出一种计及报警信息逻辑关联的改进模糊Petri网(Improved Fuzzy Petri Net, IFPN)故障诊断模型，充分利用保护动作和断路器跳闸的逻辑关联特性，建立输电网故障诊断的IFPN模型，并简化模糊推理分析过程及矩阵运算规模，以提高计算速度。通过对某局部电力系统进行多组算例测试，验证了模型的有效性和容错性。

报警信息动作特性分析

由传输信道干扰、自动化水平等因素造成的报警信息漏报以及继保装置误动作或拒动作事件，可能导致电网故障的误诊断^[12]。因此，为准确分析故障原因，及时给调度人员提供辅助决策，需先充分研究报警信息的动作特性，以便后续进行有效筛选与识别。

逻辑关联性是报警信息的主要动作特性^[13]，如图1所示。当电力系统发生故障时，故障点附近区域的电压、电流等电气量会发生较大的突变，若突变量或突变后的电气量满足继电保护动作判据，则主保护率先动作，给相应断路器发出跳闸信号，使断路器跳闸切除故障

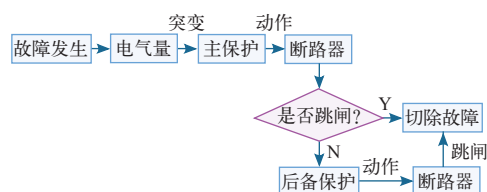


图1 报警信息逻辑关联特性

南方电网公司重点科技项目。

障；若断路器拒动作，则由后备保护动作，使相应断路器跳闸。

改进模糊Petri网

1. IFPN的基本定义

结合模糊Petri网的定义，IFPN可以描述为一个六元组，即

$$\text{IFPN} = (P, T, I, O, \theta^0, T_h) \quad (1)$$

式中

1) $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ ，表示库所结点的有限集合（ n 维）。

2) $T = \{t_1, t_2, \dots, t_m\}$ ，表示变迁结点的有限集合（ m 维）。

3) $I: P \rightarrow T$ ，表示各库所到变迁的输入弧权重矩阵（ $n \times m$ 维）， $I = [\omega_{ij}]$ ， $\omega_{ij} \in [0, 1]$ ，当 p_i 是 t_j 的输入时， ω_{ij} 的值为该有向弧的权重；当 p_i 不是 t_j 的输入时， $\omega_{ij} = 0$ 。

4) $O: T \rightarrow P$ ，表示各变迁到库所的输出弧置信度矩阵（ $m \times n$ 维）， $O = [\mu_{ij}]$ ， $\mu_{ij} \in [0, 1]$ ，当 p_j 是 t_i 的输出时， μ_{ij} 的值为该有向弧的置信度；当 p_j 不是 t_i 的输出时， $\mu_{ij} = 0$ 。

5) $\theta^0 = [\theta_{p_1}^0, \theta_{p_2}^0, \dots, \theta_{p_n}^0]$ ，表示各库所的初始置信度矩阵（ n 维）， $\theta_{p_i}^0 \in [0, 1]$ ，根据接收到的保护和断路器动作信息确定初始概率。

6) $T_h = [\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_m]$ ，表示各变迁点火阈值矩阵（ m 维）， $\lambda_i \in [0, 1]$ ，当变迁 t_i 的输入概率大于 λ_i 时，该变迁才被激发。

2. 模糊推理规则

在模糊Petri网的推理过程中，多数采用传统的“与”规则、“或”规则及其组合式规则，没有充分考虑到保护动作和断路器跳闸的逻辑关联特性对故障诊断的重要影响。因此，本文提出的IFPN模型着重加强了推理规则的制定。图2为某

简单系统中母线 B_1 的IFPN模型，若母线 B_1 发生故障，则主保护 B_{1m} 动作，给断路器 CB_1 发出跳闸信号；若 CB_1 拒动作，则由后备保护 S_s 动作，跳开相应断路器 CB_s 。

与模糊Petri网的网络结构相比，本文主要在两个方面进行了改进：①用图中虚线来体现断路器拒动作与后备保护动作的逻辑关联特性，有利于模糊推理；②减少中间库所和变迁的总数，如图2中仅有 p_1 、 p_2 两个中间库所和四个变迁，简化了矩阵运算规模，使计算量大大减小。

实际应用中，为便于描述，IFPN模型通过矩阵运算首先采用三个算子：①矩阵乘法 $\cdot$ ，若 $C = A \cdot B$ ，则 $c_{ij} = \sum_{k=1}^l a_{ik} b_{kj}$ ；②直乘算子 $\odot$ ，若 $C = A \odot B$ ，则 $c_{ij} = a_{ij} b_{ij}$ ；③比较算子 $\odot$ ，若 $C = A \odot B$ ，则当 $a_{ij} > b_{ij}$ 时， $c_{ij} = a_{ij}$ ，否则 $c_{ij} = 0$ 。

由此可得IFPN的矩阵推导公式如下：

1) 计算变迁的输入概率矩阵，即

$$P^{k+1} = \theta^k \cdot I \quad (2)$$

式中， k 为迭代次数，初始值为0； P^{k+1} 为 m 维矩阵。

2) 将变迁的输入概率与点火阈值相比较，即

$$G^{k+1} = P^{k+1} \odot T_h \quad (3)$$

式中， G^{k+1} 为变迁的输出概率矩阵（ m 维）。

3) 计算库所的下一步状态，经第一次推理得

$$\theta^1 = G^1 \cdot O \quad (4)$$

重复上述过程，经第二次推理得

$$\theta^2 = G^2 \odot O(:, \text{end})^T \quad (5)$$

式中， $O(:, \text{end})$ 为矩阵 O 的最后一列元素构成的矩阵（ m 维）。

4) 终端库所的置信度为 $\theta_{p_n} = \max(\theta^2)$ ，推理结束。

基于IFPN的输电网故障诊断

基于IFPN模型的输电网故障诊断基本思路可以概括为三点：①输电网中的某一个或多个元件发生短路后，相应的保护和断路器会动作切除故障，形成一个或多个故障停电区域，因此，首先需要搜索停电区域的可疑故障元件；②充分考虑断路器拒动作后故障可能蔓延的方向，建立可疑

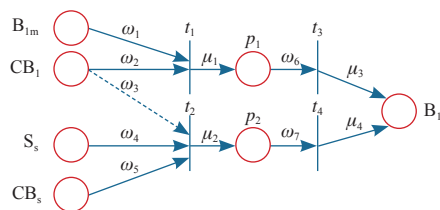


图2 IFPN的网络结构示意图

故障元件的IFPN诊断模型；③根据实际接收的报警信息，对可疑故障元件进行筛选与识别，并分析继保装置的动作行为。

1. 故障停电区域搜索

结线分析法利用母线、线路及变压器等元件的保护和断路器的逻辑关联关系，构建元件集合及网络搜索策略，可实现停电区域及其中可疑故障元件的快速搜索与识别，有助于提高故障诊断的速度。因此，本文采用结线分析法对故障报警信息进行初步处理，将诊断范围迅速缩小到具体元件，大大减少了计算量，具体分析流程参见文献[13]，在此不再赘述。

2. 母线和线路的IFPN故障诊断模型

确定可疑故障元件后，需建立元件的故障诊断模型。以图3的局部电力系统模型为例，详细说明了母线和线路的IFPN建模过程。该系统包含28个元件，即4条单母线 $A_1 \sim A_4$ 、8条双母线 $B_1 \sim B_8$ 、8台变压器 $T_1 \sim T_8$ 和8条联络线路 $L_1 \sim L_8$ ，此外，还有40个断路器 $CB_1 \sim CB_{40}$ ，其中母联断路器均配置失灵保护。

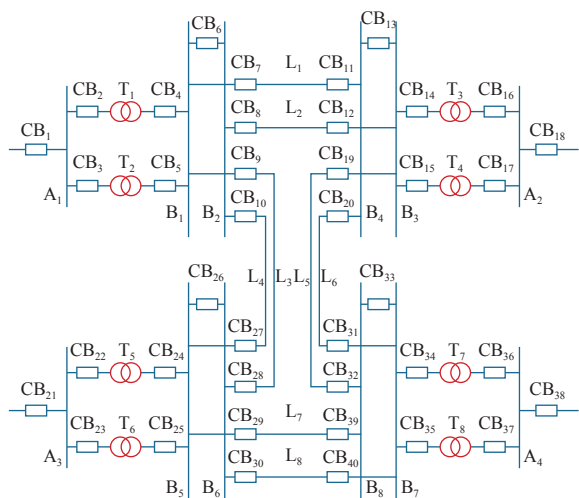


图3 局部电力系统模型

(1) 母线

以母线 B_1 为例：若母线 B_1 发生故障，则分析可能的故障蔓延方向（变压器 T_1 、 T_2 ，线路 L_1 、 L_3 ，母联断路器 CB_6 ），并着重研究主保护或相应断路器拒动作时后备保护和断路器的逻辑配合关系，在此基础上，建立母线 B_1 的IFPN模型，如图4所示。

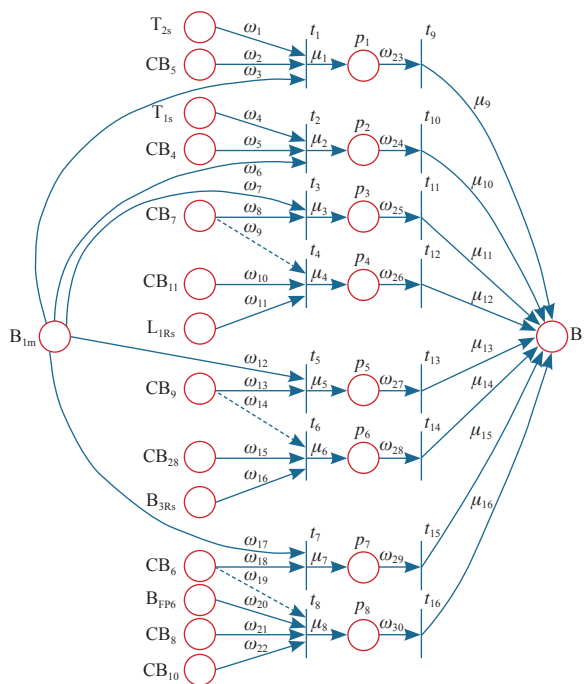


图4 母线 B_1 的IFPN模型

图4中，库所变量名的下标符号m表示主保护，s表示远后备保护；FP表示失灵保护；R表示线路的受端。如 L_{1Rs} 表示线路 L_1 的受端远后备保护。

(2) 线路

以线路 L_1 为例：若线路 L_1 发生故障，分别从线路两端（送端S、受端R）分析可能的故障蔓延方向（S端的线路 L_3 ，变压器 T_1 、 T_2 ，母联断路器 CB_6 ；R端的线路 L_6 ，母联断路器 CB_{13} ），建立线路 L_1 的IFPN模型，如图5所示。

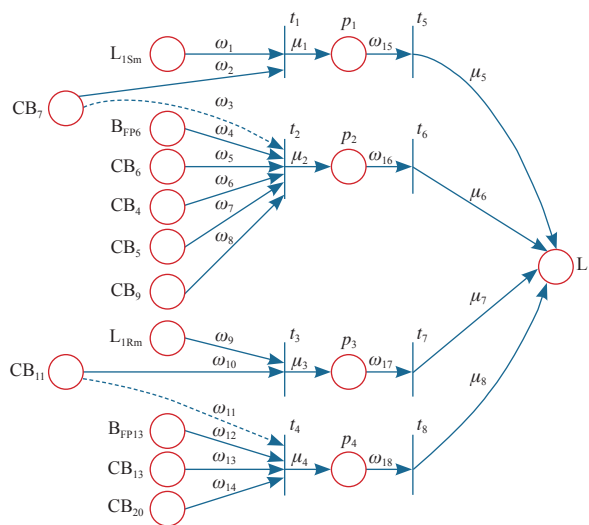


图5 线路 L_1 的IFPN模型

3. 参数初始化设置

在构建了可疑故障元件的IFPN模型之后,下一步就是根据调度端接收到的报警信息对有关参数进行初始化设置。

(1) 库所初始置信度

根据接收到的报警信息,对保护和断路器动作的置信度进行初始化设置,结果如表1所示。其中,将母联断路器的失灵保护视作近后备保护。

表1 保护、断路器动作的置信度设置

元件	主保护		近后备保护		远后备保护	
	保护	断路器	保护	断路器	保护	断路器
母线	0.932 9	0.983 3	0.863 4	0.913 4	0.807 9	0.857 9
线路	0.991 3	0.983 3	0.911 7	0.961 7	0.858 3	0.908 3
变压器	0.911 7	0.983 3	0.844 2	0.894 2	0.789 5	0.839 5

考虑到报警信息的不确定性,对未动作的保护和断路器设置一个较小的初始置信度,以使诊断结果更加准确,本文设为0.2。

(2) 变迁输入弧权重

电网故障时,首先是主保护动作,继而引起相应断路器跳闸,若断路器拒动作,则由后备保护动作。考虑到保护和断路器的逻辑关联特性及对故障影响程度的不同,给保护和断路器库所到变迁的输入弧赋予不同的权重,分别设为0.6和0.4。此外,为增强模型对不确定报警信息的容错性,对拒动作断路器和后备保护库所连接的变迁之间的有向弧也赋予了权重,若未接收到断路器动作信息,则此有向弧权重为0.4,否则为0。

(3) 变迁输出弧置信度

根据建立的输电网元件IFPN故障诊断模型,可将变迁分为两种类型:与中间库所输入弧连接的统称为第一类变迁;与终端库所输入弧连接的统称为第二类变迁。考虑到容错性,可将第一类变迁输出弧置信度设为0.95,第二类变迁输出弧置信度设为1。

(4) 变迁点火阈值

考虑接收到的报警信息在故障诊断中的重要作用,以及未动作的保护和断路器初始置信度设置情况,定义第一类变迁点火阈值为0.2,第二类变迁点火阈值为0。

4. 故障诊断推理分析

利用图3的电网,举例说明基于IFPN的故障诊断推理过程。调度中心收集到如下报警信息:母线 B_1 主保护 B_{1m} 、线路 L_1 受端远后备保护 L_{1Rs} 动作,断路器 CB_4 、 CB_5 、 CB_6 、 CB_9 和 CB_{11} 跳闸。

首先根据前述结线分析法,诊断出可疑故障元件为母线 B_1 和线路 L_1 (其IFPN故障诊断模型见图4、图5)。

在接收到的保护和断路器动作信息中,与母线 B_1 相关联的为 B_{1m} 、 L_{1Rs} 、 CB_4 、 CB_5 、 CB_6 、 CB_9 和 CB_{11} ,则图4中对应库所的置信度分别为0.932 9、0.807 9、0.983 3、0.983 3、0.983 3、0.983 3和0.857 9,而其他保护和断路器库所的置信度均取0.2,中间库所和终端库所的置信度为0。根据模糊推理规则的定义,第1次迭代运算可得中间库所 $p_1 \sim p_8$ 的置信度分别为0.696 5、0.696 5、0.607 8、0.862 5、0.905 4、0、0.905 4和0;第2次迭代运算可得终端库所 B_1 的置信度为0.905 4。

同理,与线路 L_1 相关联的报警动作信息为 CB_4 、 CB_5 、 CB_6 和 CB_{11} ,经过模糊推理分析,可得终端库所 L_1 的置信度为0.555 4。根据经验,定义终端库所置信度大于0.7时,即认为对应元件发生故障。因此,算例的诊断结果为母线 B_1 发生故障。

算例仿真

为验证本文所提方法的有效性,以图3的局部电力系统为研究对象,根据采集到的六种继保装置动作信息,运用模糊推理规则进行故障诊断,测试结果如表2所示。

表2中的算例1~算例3和算例4~算例6分别为单重故障和多重故障下的诊断结果。其中,算例1和算例4在信息完备且继保装置均正确动作的情况下,通过推理分析可以得到正确的故障诊断结果;算例2和算例5中尽管继保装置存在误动作,但仍能诊断出实际的故障元件,然后通过分析继保装置的动作信息,正确评价出保护和断路器的实际动作行为;算例3和算例6考虑了断路器拒动作且保护信息丢失的情况,虽然可疑故障元件数增多,但仍能有效地给出诊断结果。

表2 局部电力系统的测试结果

编号	报警信息	可疑故障元件/置信度	诊断故障元件	实际故障元件	继保装置动作行为辨识
1	B _{2m} 、CB ₆ 、CB ₈ 和CB ₁₀ 动作	B ₂ /0.905 4	B ₂	B ₂	正确动作
2	B _{2m} 、L _{2Sm} 、CB ₄ 、CB ₆ 、CB ₈ 和CB ₁₀ 动作	B ₂ /0.905 4	B ₂	B ₂	L _{2Sm} 、CB ₄ 误动作
3	B _{2m} 、CB ₆ 、CB ₈ 和CB ₂₇ 动作	B ₂ /0.905 4、L ₄ /0.555 4	B ₂	B ₂	L _{4Rs} 漏报、CB ₁₀ 拒动作
4	B _{2m} 、L _{1Sm} 、L _{1Rm} 、CB ₆ 、CB ₇ 、CB ₈ 、CB ₁₀ 和CB ₁₁ 动作	B ₂ /0.905 4、L ₁ /0.938 7	B ₂ 、L ₁	B ₂ 、L ₁	正确动作
5	B _{2m} 、L _{1Sm} 、L _{1Rm} 、T _{1s} 、L _{2Rs} 、CB ₄ 、CB ₆ 、CB ₇ 、CB ₈ 、CB ₁₀ 和CB ₁₁ 动作	B ₂ /0.905 4、L ₁ /0.938 7	B ₂ 、L ₁	B ₂ 、L ₁	T _{1s} 、CB ₄ 、L _{2Rs} 误动作
6	B _{2m} 、L _{1Sm} 、L _{2Rs} 、CB ₆ 、CB ₇ 、CB ₁₀ 、CB ₁₁ 和CB ₁₂ 动作	B ₂ /0.905 4、L ₁ /0.938 7、L ₂ /0.555 4	B ₂ 、L ₁	B ₂ 、L ₁	L _{1Rm} 漏报、CB ₈ 拒动作

通过上述分析可知，本文提出的基于IFPN的输电网故障诊断方法是完全有效的，不论是对单重故障还是多重故障，均有正确的诊断结果。

结束语

本文充分考虑了报警信息的逻辑关联特性及保护和断路器对故障诊断的不同影响程度，提出了基于IFPN的输电网故障诊断模型。通过单重故障和多重故障的仿真分析，表明该模型的正确性和有效性，且对不完备的报警信息及保护与断路器的不确定性动作行为均具有较好的容错性。

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．

[2] 文福拴，韩祯祥．基于遗传算法和模拟退火算法的电力系统的故障诊断[J]．中国电机工程学报，1994，14(3)：29-35．

[3] Yang H T, Chang W Y, Huang C L. A new neural networks approach to on-line fault section estimation using information of protective relays and circuit breakers[J]．IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(1)：220-230．

[4] Guo Wenxin, Wen Fushuan, Ledwich G. An analytic model for fault diagnosis in power systems considering malfunctions of protective relays and circuit breakers[J]．IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(3)：1393-1401．

[5] Chen W H. Fault section estimation using fuzzy

matrix-based reasoning methods[J]．IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(1)：205-213．

[6] Vito Calderaro, Christoforos N H, Antonio Piccolo, et al. Failure identification in smart grids based on Petri net modeling[J]．IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(10)：4613-4623．

[7] 孙静，秦世引，宋永华．一种基于Petri网和概率信息的电力系统故障诊断方法[J]．电力系统自动化，2003，27(13)：10-14, 23．

[8] Sun Jing, Qin Shiyin, Song Yonghua. Fault diagnosis of electric power systems based on fuzzy Petri nets[J]．IEEE Transactions on Power Systems, 2004, 19(4)：2053-2059．

[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．

[11] 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．

[12] 郭创新，彭明伟，刘毅．多数据源信息融合的电网故障诊断新方法[J]．中国电机工程学报，2009，29(31)：1-7．

[13] 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]．四川：西南交通大学，2014．

(收稿日期：2015-05-15) **EA**