

基于概率 Petri 网的电网短路故障诊断研究

席红光, 秦三营, 郑东方, 张坤明, 王银萍, 何萌

国网商丘供电公司, 河南 商丘, 476000;

Research of Grid Short-Circuit Fault Diagnosis Based on Probability Petri Net Model

XI Hongguang, Qin Sanying, Zheng Dongfang, Zhang Kunming, Wang Yinping, He Meng

State Grid Power Supply Company of Shangqiu, Henan Shangqiu, 476000.

摘要: 本文紧紧围绕大型电网的复杂故障及保护或断路器的拒动、误动两个问题, 在电网短路故障诊断的建模方法、不确定信息处理及空间组合爆炸等方面进行了深入分析, 采用了基于概率 Petri 网模型的电网短路故障诊断方法, 并针对 IEEE.118 部分母线标准实验线路进行了概率 Petri 网的建模、分析, 且就此实验线路验证了该模型对电网短路故障进行诊断的可行性及准确性。

关键词: 电网; 概率 Petri 网模型; 短路故障诊断; 不确定信息; 空间组合爆炸

ABSTRACT: In this paper, based on the complex fault of Large power grid and the refusing and error action of protection or circuit breaker. Analysis the grid short-circuit fault diagnosis modeling method, uncertain information processing and space combination explosion, etc, and adopt the research of grid short-circuit fault diagnosis based on probability petri net model. In view of the IEEE 118 bus standard experimental circuit using the probability Petri net to build a model and analysis, then the model is verified by the experimental circuit for the feasibility and effectiveness of the grid short-circuit fault diagnosis.

KEY WORD: power system; probability Petri net model; short circuit fault diagnosis; uncertain information; space combination explosion

1 引言

本文针对当前电网短路故障诊断方法的不足之处, 采用了一种结合 Petri 网模型对电网故障进行建模和分析的方法^[1-3], 并考虑到 Petri 网在对电网进行短路故障诊断时可能会出现空间组合爆炸的问题以及传统 Petri 网不能有效处理电网中保护和断路器出现不确定信息的缺陷。于是针对传统 Petri 网的不足进行了一定改进, 形成了一种结合概率信息的 Petri 网模型, 并在此基础上采用了一种针对电网中存在不确定信息的情况下可以有效、准确识别出故障元件的概率推理规则, 形成了一种针对大型电网中各个元件分别建立概率 Petri 网模型的方法^[4]。该方法可以解决电网规模过于庞大时传统 Petri 网模型可能发生诊断爆炸问题, 可针对电网中保护或断路器可能出现的拒动、误动及 SCADA 系统所监测故障信息的不准确性赋予保护和相应断路器正确动作的概率值。

2 概率 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。本文所用概率 Petri 网是在传统 Petri 网的基础上融入概率信息并改进推理规则后所形成的。

2.1 概率 Petri 网模型的定义及推理规则

定义 1: 三元组 $\Sigma = (P, T, F)$ 满足以下条件就称为有向网: ① $P \cup T \neq \phi$; ② $P \cap T \neq \phi$; ③ $F \subseteq P \times T \cup T \times P$ 。其中: $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$ 是一个库所集, 在概率 Petri 网模型中用符号“O”表示; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 是一个变迁集, 在概率 Petri 网模型中用符号“|”表示; F 表示 P 与 T 之间的流关系; ϕ

表示空集。

定义 2: 概率 Petri 网模型的结构可用下述八元组来表示:

$$N = (P, T, F, W, M_0, f, P_p, P_t)$$

其中: W 表示 N 上的权函数; M_0 表示 N 的初始标识, 即该在初始状态时的资源分布; f 表

$$p(t_i) = f(t_i) = \prod_{j=1}^h p(p_j) \quad (1)$$

其中 h 表示变迁之前连接的库所个数。

式中: h 是满足条件 $\forall p_j \in P$ 和 $p_j \in t_i^{pre}$ 的属于变迁 t_i 的前端库所的数目; $p(t_i)$ 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以下公式求得:

$$p(p_j) = f(p_j) = \max_k [p(t_k)] \quad (t_k \in p_j^{pre}) \quad (2)$$

$p(t_i)$ 和 $p(p_j)$ 都是在变迁的基础上定义的, 其概率关联函数是根据逻辑推理的规则求得概率值。其中, f 代表有向弧传递托肯概率的函数; $p(t_i)$ 代表变迁满足触发条件而触发的概率; $p(p_j)$ 代表库所处于某种状态的概率。概率 Petri 网的库所中包含的托肯表示该库所处于了一种非常态。另外由于概率 Petri 网是在传统 Petri 网的基础上建立的, 所以其库所、变迁以及托肯的定义及表示方式均与传统 Petri 网保持一致。

定义 3: 在概率 Petri 网模型中, $(p, t) \in F$ 表示从库所 p 到变迁 t 之间存在有向通道; $(t, p) \in F$ 表示从变迁 t 到库所 p 之间存在有向通道, 具体如下所示:

$$C = \begin{cases} -c_{ij} & (p_i, t_j) \in F \\ c_{ij} & (t_i, p_j) \in F \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

如果一个 Petri 网模型中包含 m 个库所, n 个变迁, 其对应的关联矩阵 C 就可以表示为 $C_{m \times n}$, 即 C 是一个 m 行, n 列的矩阵, 关联矩阵中的元素 c_{ij} 可以表示为: $c_{ij} = c_{ij}^+ - c_{ij}^-$ 。其中, c_{ij}^+ 表示从变迁 i 到其后继库所 j 之间有向弧传递库所中

示变迁发生概率的计算函数;

$P_p = [p(p_1), p(p_2), \dots, p(p_n)]$ 表示库所对应的状态概率向量; $P_t = [p(t_1), p(t_2), \dots, p(t_n)]$ 表示变迁所对应的状态概率向量。根据 Petri 网模型中变迁 t_i 的触发规则, 规定 t_i 的概率值取决于其前集 t_i^{pre} 中所有库所的概率值, 且由函数 $f(\circ)$ 决定, 在此定义:

托肯的概率, c_{ij}^- 表示从变迁 i 到其前端库所 j 之间有向弧传递库所中托肯的概率;

定义 4: 在概率 Petri 网模型中, 库所中托肯的转移以及变迁的触发遵循以下规则:

$$M_n = M_{n-1} + CU_{n-1} \quad (4)$$

其中, M_n 与 M_{n-1} 分别表示相应库所在 n 时刻与 $n-1$ 时刻的状态集合向量; C 表示该概率 Petri 网的关联矩阵, U_{n-1} 表示 $n-1$ 时刻使某一变迁触发的向量, 关联矩阵中对应库所位置的值非零代表对应的库所含有托肯, 其值即为托肯获取的概率。

以上四个定义确定了一个结合概率信息的 Petri 网模型。

2.2 概率 Petri 网中元件动作概率值的整定

由于本文所用概率 Petri 网模型的推理过程建立在了概率推理的基础上, 在电网短路故障诊断中概率 Petri 网的每一次动态行为也具有相应的概率值。考虑对保护和相应断路器的正确动作情况分别赋值一定的概率来解决电网中保护装置的拒动或误动问题, 并且保护和断路器作为电网的保护装置, 其概率值则是概率 Petri 网模型中第一层的库所。并且概率值的选取方法将直接影响概率 Petri 模型的诊断结果。

本文在往年电网继电保护运行真实数据的基础上, 利用最大似然估计算法对保护和相应断路器故障的概率进行计算, 即根据一次设备在一年中发生故障的频率 w 来计算:

$$p(T \leq t) = 1 - e^{-wt} \quad (5)$$

该式表示电网中元件在连续运行一段时间 t 后, 故障发生的概率可表示为 t 的函数, 其中 T 为设备持续无故障运行的时间。

然而由于概率 Petri 网的参数是随着网络结构和

元件的可靠性而变化的,因此,为了提高诊断的准确度,减少诊断耗用的时间。所以故障概率计算的方法需要进行如下调整:

在此选择 N 条线路,假设检测到其中 c 条发生故障, l 条未发生故障;且在 c 条线路中有 r_c 条线路保护发生误动, g_l 条保护均正确动作。则根据数据的极大似然估计可知:

$$P(d|h_{\theta_1, \theta_2}) = \theta^c (1-\theta)^l \theta_1^{r_c} (1-\theta_1)^{g_l} \theta_2^{g_l} (1-\theta_2)^{g_l} \quad (6)$$

对两边取对数可得:

$$L = [c \log \theta + l \log(1-\theta)] + [r_c \log \theta_1 + g_l \log(1-\theta_1)] + [g_l \log \theta_2 + g_l \log(1-\theta_2)] \quad (7)$$

若要求 L 的最大值,只需对 L 两端同时求导

$$\text{即: } \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0, \frac{\partial L}{\partial \theta_1} = 0, \frac{\partial L}{\partial \theta_2} = 0:$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta} = \frac{c}{\theta} - \frac{l}{1-\theta} = 0 \Rightarrow \theta = \frac{c}{c+l} \quad (8)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_1} = \frac{r_c}{\theta_1} - \frac{g_l}{1-\theta_1} = 0 \Rightarrow \theta_1 = \frac{r_c}{r_c + g_l} \quad (9)$$

$$\frac{\partial L}{\partial \theta_2} = \frac{g_l}{\theta_2} - \frac{g_l}{1-\theta_2} = 0 \Rightarrow \theta_2 = \frac{g_l}{g_l + g_l} \quad (10)$$

其中, θ 代表调度中心监测到发生故障的概率; θ_1 代表保护和断路器不正确动作的概率; θ_2 代表保护和断路器出现拒动的概率。

为了提高本文所提出的针对各级电网进行短路故障诊断方法的通用性,根据文献^[5]各电压等级保护设备正确动作概率情况,特取 220kV 以上各电压等级继电保护动作概率的平均值即:保护装置正确动作的概率为 $18303 \div 18317 = 0.9992$ 。

为了使断路器的正确动作概率值更具有参考性,取文献^[6]中 2000~2004 年的断路器正确动作概率值的平均值,根据计算可知断路器正确动作的概率是: 0.9833。

在大型电网短路故障诊断中,可能会出现元件的主保护因拒动导致其第一后备保护或者第二后备保护启动跳开相应断路器的情况,此时断路器动作概率值的选取就要区别于主保护对应断路器的概率值。当前在电网短路故障诊断中主要采取人为设定断路器正确动作的概率值或者通过往年数据求取电网中所有断路器动作的统一概率值,也就是在任何保护装置动作跳开断路器时均采用同一概率值(即断路器的通用概率值),断

路器正确动作的概率值并没有根据保护性质的不同而改变,因此该取值方法不具备电网在存在拒动或误动时的通用性,甚至在电网短路故障诊断中会出现错误结果。

因此,本文将根据不同的保护(主保护、第一后备保护、第二后备保护)选取相应的断路器的动作概率值。另外,由于资料中没有统计后备保护的動作情况,所以本文仍根据以往的保护运行经验对后备保护正确动作概率值进行设定。并且规定断路器的动作概率与保护的性质有关,即主保护动作的概率为 0.9992;断路器的动作概率为 0.9833;第一后备保护动作的概率为 0.8,第一后备保护跳开断路器的概率值为 0.85;第二后备保护动作的概率为 0.7,第二后备保护跳开断路器的概率值为 0.75。

3 概率 Petri 网的建模及其关联矩阵

在电网的短路故障诊断中,随着电网规模的逐渐增大其诊断过程更容易出现状态空间的组合爆炸。由于概率 Petri 网的触发过程与电网中元件的继电保护装置动作的机理相吻合。故以概率 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。

由于概率 Petri 网模型中各组成元素间具备一定的层次性,而电网的元件、保护装置和断路器之间在逻辑结构上也可以分层处理。可以结合概率 Petri 网的分层特点并根据大型电网中不同区域及功能,将电网划分为不同层次的若干个子系统,循环此过程直至将大型电网分解为一个一个独立的元件,并利用 Petri 网对每个元件单独建模,然后将具有相同保护和断路器的元件按照逻辑关系嵌套成子系统,进而组成大型电网。下面以图 1 所示 IEEE.118 部分母线标准实验线路为例说明概率 Petri 网的建模方法:

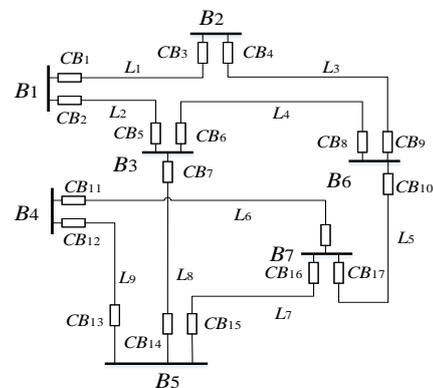


图 1 IEEE.118 部分母线标准实验线路

Fig.1 Part. IEEE 118 bus standard experimental circuit

图 1 中共包含 16 个元件依次为: 母线 $B_1 - B_7$ 、输电线路 $L_1 - L_9$; 18 个断路器依次是: $CB_1 - CB_{18}$; 25 个主保护依次为: $SB_{1m} - SB_{7m}$ 、 $SL_1Sm - SL_9Sm$ 、 $SL_1Rm - SL_9Rm$; 36 个后备保护分别为: $SL_1Sp - SL_9Sp$ 、 $SL_1Rp - SL_9Rp$ 、 $SL_1Ss - SL_9Ss$ 、 $SL_1Rs - SL_9Rs$ 。其中第一个大写字母 S 代表元件的保护装置, 第二个大写字母 S 、 R 分别代表元件的首端、末端, 小写字母 m 、 p 、 s 分别代表元件的主保护、第一后备保护及第二后备保护。

如图 2 所示: 该图中有两个输入库所 P_1 、 P_2 , 一个变迁 t_1 和一个输出库所 P_3 , 且构成了一个最基本的 Petri 网模型。其中库所 P_3 代表发生故障的元件, 库所 P_1 、 P_2 分别代表该元件对应的一个保护装置和相应断路器, 其逻辑诊断过程为: 当元件 P_3 发生故障后, 保护 P_1 动作引起断路器 P_2 跳闸, 且只有元件所对应的所有保护和断路器均正确动作才能有效的隔离出故障元件。

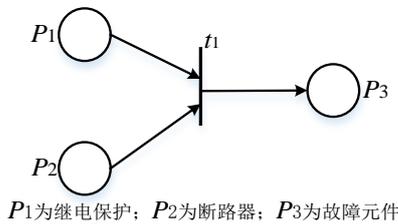


图 2 Petri 网的基本模型

Fig.2 The basic model of Petri net

由于线路的状态是由其两端的的状态所决定, 且可以看出该模型是根据线路 L_1 的两个接口即 S 和 R 两端的基本 Petri 网模型通过相应的逻辑关系而组成, 且元件的该 Petri 网模型体现了嵌套的模型设计思想。如果元件存在多个端口与系统进行连接, 则可通过多端口中的两两端口组合形成该元件的 Petri 网模型。上述对电网进行多个层次的划分可以有效解决电网出现复杂故障时的诊断问题以及 Petri 网模型状态空间的组合爆炸问题。根据 Petri 网模型之间的嵌套规则, 通过基本 Petri 网模型组合成为针对元件进行诊断的 Petri 网模

型, 图 3 是图 1 中线路 L_1 的 Petri 网诊断模型图, 且该模型由六个基本模型以及虚拟库所之间的逻辑连接而组成。

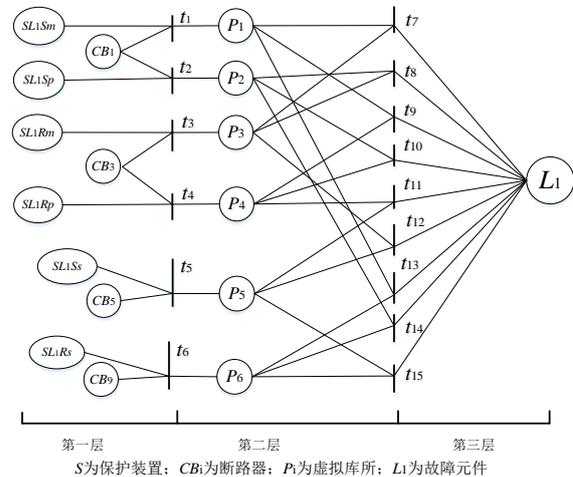


图 3 线路 L_1 故障诊断的概率 Petri 网模型图

Fig.3 Probability Petri net model diagnostic plot of line L_1

事实上, 针对图 1 中 16 个元件可以形成 16 个这种概率 Petri 网短路故障诊断模型, 每一个模型都是一个相互交织的并行网模型, 各个系统元件的诊断流程具有独立性。在电网中发生多处故障时, 只需根据每个元件的概率 Petri 网的模型进行故障分析, 最后由系统统一反馈综合的诊断结果, 既可以完成电网复杂甚至多处故障的诊断。

定义 5: 根据托肯传递方向以及变迁触发规则可知: 概率 Petri 网所对应的关联矩阵 C 中第二层、第三层概率值的求解公式分别是:

$$c'_{ij} = \prod_{\substack{k \in (1, n) \\ c_{kj} \neq 0}} c_{kj} \quad (11)$$

$$c''_{ij} = \prod_{\substack{k \in (1, n) \\ c'_{kj} \neq 0}} c'_{kj} \quad (12)$$

其中, c'_{ij} 表示 C 中第一层的概率值; c''_{ij} 表示 C 中第二层的概率值; c'''_{ij} 表示 C 中第三层的概率值。

本文将元件故障诊断的概率 Petri 网模型划分为三个层次, 并根据 SCADA 系统监测到的故障信息直接形成模型的初始表示 M_0 , 进而根据 M_0 形成关联矩阵 C 。并直接根据公式 11、12 可在关联矩阵中直接通过逻辑运算模拟出托肯的有向传递, 具体过程如下: 首先取出 C 中第一层的概率值, 经过逻辑

公式的计算,推导出概率 Petri 网模型中第二层的概率值,进而根据第二层的概率值,按照故障的传播规则,直接形成第三层的概率值,而该层的概率值即表示元件发生故障的概率值。如果第三层中只有一个概率值的话,即表示故障元件只有一种可能,且按照概率值的来源即可反向推导出保护和断路器准确动作情况;而如果第三层中含有多个概率值,则通过故障诊断的原则,根据公式 2 取较大的概率值作为故障元件的发生概率,并按照此概率值的来源进行反向推导就可

以得出正确动作的保护和断路器,同时也区分了不正确动作的保护装置或断路器。综上,关联矩阵 C 表示了故障的传播过程:即故障的传播方向是由上至下、由左至右,且矩阵中每一个概率值表示关联库所、变迁的可信度值,故障的传递矩阵以概率值的形式表示了故障传播的可能性。

根据概率 Petri 网的建模方法、托肯的有向传递及变迁的触发规则,并结合保护和相应断路器正确动作的概率值及公式 11、12,可形成线路 L_1 的概率 Petri 网模型的关联矩阵 $C = C\{c_{ij}\}$ 可以表示为:

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{15}
SL_1Sm	c_{11}	c_{12}	c_{13}	c_{14}	c_{15}	c_{16}	c_{17}	c_{18}	c_{19}	$c_{1,10}$	$c_{1,11}$	$c_{1,12}$	$c_{1,13}$	$c_{1,14}$	$c_{1,15}$
CB_1	c_{21}	c_{22}	c_{23}	c_{24}	c_{25}	c_{26}	c_{27}	c_{28}	c_{29}	$c_{2,10}$	$c_{2,11}$	$c_{2,12}$	$c_{2,13}$	$c_{2,14}$	$c_{2,15}$
SL_1Sp	c_{31}	c_{32}	c_{33}	c_{34}	c_{35}	c_{36}	c_{37}	c_{38}	c_{39}	$c_{3,10}$	$c_{3,11}$	$c_{3,12}$	$c_{3,13}$	$c_{3,14}$	$c_{3,15}$
SL_1Rm	c_{41}	c_{42}	c_{43}	c_{44}	c_{45}	c_{46}	c_{47}	c_{48}	c_{49}	$c_{4,10}$	$c_{4,11}$	$c_{4,12}$	$c_{4,13}$	$c_{4,14}$	$c_{4,15}$
CB_3	c_{51}	c_{52}	c_{53}	c_{54}	c_{55}	c_{56}	c_{57}	c_{58}	c_{59}	$c_{5,10}$	$c_{5,11}$	$c_{5,12}$	$c_{5,13}$	$c_{5,14}$	$c_{5,15}$
SL_1Rp	c_{61}	c_{62}	c_{63}	c_{64}	c_{65}	c_{66}	c_{67}	c_{68}	c_{69}	$c_{6,10}$	$c_{6,11}$	$c_{6,12}$	$c_{6,13}$	$c_{6,14}$	$c_{6,15}$
SL_1Ss	c_{71}	c_{72}	c_{73}	c_{74}	c_{75}	c_{76}	c_{77}	c_{78}	c_{79}	$c_{7,10}$	$c_{7,11}$	$c_{7,12}$	$c_{7,13}$	$c_{7,14}$	$c_{7,15}$
CB_5	c_{81}	c_{82}	c_{83}	c_{84}	c_{85}	c_{86}	c_{87}	c_{88}	c_{89}	$c_{8,10}$	$c_{8,11}$	$c_{8,12}$	$c_{8,13}$	$c_{8,14}$	$c_{8,15}$
$C = SL_1Rs$	c_{91}	c_{92}	c_{93}	c_{94}	c_{95}	c_{96}	c_{97}	c_{98}	c_{99}	$c_{9,10}$	$c_{9,11}$	$c_{9,12}$	$c_{9,13}$	$c_{9,14}$	$c_{9,15}$
CB_9	$c_{10,1}$	$c_{10,2}$	$c_{10,3}$	$c_{10,4}$	$c_{10,5}$	$c_{10,6}$	$c_{10,7}$	$c_{10,8}$	$c_{10,9}$	$c_{10,10}$	$c_{10,11}$	$c_{10,12}$	$c_{10,13}$	$c_{10,14}$	$c_{10,15}$
P_1	$c_{11}c_{21}$						$c_{11}c_{21}$		$c_{11}c_{21}$				$c_{11}c_{21}$		
P_2		$c_{22}c_{32}$						$c_{22}c_{32}$		$c_{22}c_{32}$				$c_{22}c_{32}$	
P_3			$c_{43}c_{53}$				$c_{43}c_{53}$	$c_{43}c_{53}$				$c_{43}c_{53}$			
P_4				$c_{54}c_{64}$				$c_{54}c_{64}$	$c_{54}c_{64}$	$c_{54}c_{64}$					
P_5					$c_{75}c_{85}$					$c_{75}c_{85}$	$c_{75}c_{85}$				$c_{75}c_{85}$
P_6						$c_{96}c_{10,6}$						$c_{96}c_{10,6}$	$c_{96}c_{10,6}$	$c_{96}c_{10,6}$	
L_1							$p_{17}p_{37}$	$p_{28}p_{38}$	$p_{19}p_{49}$	$p_{2,10}p_{4,10}$	$p_{4,11}p_{5,11}$	$p_{3,12}p_{5,12}$	$p_{1,13}p_{6,13}$	$p_{2,14}p_{6,14}$	$p_{5,15}p_{6,15}$

4 逻辑检验

下面举例来说明本文所用概率 Petri 网模型针对电网短路故障进行诊断的流程:

例 1、假设 SCADA 系统检测到元件保护 SL_1Sp 、 SL_1Rm 、 SL_1Sm 以及断路器 CB_1 、 CB_3 同时动作,则根据概率 Petri 网模型的第一层库所的定义可知该模型的初始标识为:

$$M_0 = [0.9992 \quad 0.9833 \quad 0.8 \quad 0.9992 \quad 0.9833 \quad 0 \quad 0]^T$$

;

根据概率 Petri 网模型的初始标识 M_0 可以直接形成线路 L_1 的概率 Petri 网模型的关联矩阵 C :

	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}	t_{13}	t_{14}	t_{15}
SL_1Sm	-0.9992	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CB_1	-0.9833	-0.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SL_1Sp	0	-0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SL_1Rm	0	0	-0.9992	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CB_3	0	0	-0.9833	-0.85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SL_1Rp	0	0	0	-0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
SL_1Ss	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CB_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$C = SL_1Rs$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CB_9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_1	0.9825	0	0	0	0	0	0	0.9825	0	0	0	0	0	0	0
P_2	0	0.68	0	0	0	0	0	0	0.68	0	0	0	0	0	0
P_3	0	0	0.9825	0	0	0	0.9825	0.9825	0	0	0	0	0	0	0
P_4	0	0	0	0.68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P_6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
L_1	0	0	0	0	0	0	0	0.965	0.668	0	0	0	0	0	0

在上述关联矩阵中:库所 L_1 中最终包含了两个托肯,

分别是由 t_7 和 t_8 中传递过来的,比较最终传递到 L_1

中的两个托肯的概率值：即 0.965、0.668，再结合公式 1 所定义的位置 p_j 上的状态概率值，可以看出 L_1 发生了故障。通过比较概率值的大小，即可以确定 L_1 的故障是由变迁 t_8 传递过来的，且其真实概率值是 0.965，同时也可以确定主保护 SL_1Rm 、 SL_1Sm 及断路器 CB_1 、 CB_3 准确动作，并且第二后备保护 SL_1Sp 发生了误动作。

5 实例仿真

为验证本文所用概率 Petri 网模型对于大型电网短路故障诊断有效性及准确性，下面取一些具有代表性的故障事例进行仿真验证。仿真诊断结果如下表 1 所示：

表 1 部分电网短路故障诊断的结果

Tab.1 Part results of the grid short-circuit fault diagnosis

序号	监测到的故障信息	故障的诊断结果
1	保护 SL_4Ss 、 SL_4Rm 动作； 断路器 CB_2 、 CB_{14} 、 CB_8 跳 闸	L_4 发生短路故障， 且概率值为 0.271
2	保护 SB_3m 动作；断路器 CB_5 、 CB_6 、 CB_7 、 CB_{14} 跳闸	B_3 发生短路故障， 概率值为 0.948，且 CB_{14} 误动
3	保护 SB_3m 、 SL_6Sm 、 SL_6Rm 动作；断路器 CB_5 、 CB_6 、 CB_{17} 、 CB_{14} 跳闸	B_3 、 L_6 发生短路故 障，且概率值分别 为 0.932、0.965
4	保护 SL_1Ss 、 SL_1Sm 、 SL_1Sp 、 SL_1Rp 、 SL_3Sp 、 SL_3Rp 、 SL_5Sm 、 SL_3Rp 动 作；断路器 CB_3 、 CB_4 、 CB_5 、 CB_9 、 CB_{10} 、 CB_{17} 跳闸	L_1 、 L_3 、 L_5 发生短 路故障，概率值为 分别 0.357、0.462、 0.668；且 CB_2 拒动

5	保护 SB_3m 、 SL_2Ss 、 SL_2Rm 、 SL_4Ss 动作；断 路器 CB_3 、 CB_4 、 CB_5 、 CB_6 、 CB_7 、 CB_{17} 跳闸	L_2 、 L_4 、 B_3 发生 短路故障，概率值 分别为 0.516、 0.271、0.948
---	--	---

6 结语

本文针对大型电网的复杂故障及保护或断路器的拒动、误动两个问题，采用了一种结合概率信息的 Petri 网模型对电网短路故障进行建模和分析的方法。首先在大型电网的短路故障诊断中建立了针对每个元件的概率 Petri 网模型；其次针对电网短路故障中存在的确定信息，对保护和相应断路器正确动作的概率值进行了重新整定，并且对概率 Petri 网模型的故障推理规则及其关联矩阵进行了重新定义；最后通过逻辑检验及仿真验证了该方法不仅可以在大型电网发生复杂故障且存在不确定信息的情况下准确、快速诊断出故障元件，而且还可以反馈故障发生的概率值，有助于运行人员准确诊断出故障元件以达到快速恢复供电的目的，同时对概率 Petri 网的在线应用有一定指导意义。

致谢

感谢各位同事能够为本文提供理论指导和实验数据，

以致能够完成本论文的写作与投稿。

参考文献

- [1] 李日隆, 李雄刚. 利用 Petri 网对电力系统进行故障诊断[J]. 2000, 13(1): 1-4.
- [2] 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. 电力系统自动化, 2003.7: 10-14
- [3] 方培培, 李永丽, 杨晓军. Petri 网与专家系统结合的输电网络故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 02: 26-30.
- [4] 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, 09: 74-83
- [5] 张烈, 吕鹏飞, 申华, 等. 2013 年国家电网公司 220kV 及以上电压等级交流系统继电保护设备及其运行情况分析[J]. 电网技术, 2015, 04: 1153-1159.
- [6] 宋昊, 崔景春, 袁大陆. 1999~2003 年高压断路器运行分析[J]. 电力设备. 2005. 2: 6-13.

收稿日期: 2019.6.26

作者简介:

席红光 (1990-), 男, 河南商丘, 硕士, 助理工程师, 电网短路故障诊断研究

