

# 基于故障树及贝叶斯网络的继电保护系统 风险评估及故障定位方法

王文焕<sup>1</sup>, 郭鹏<sup>1</sup>, 祝洁<sup>2</sup>, 杨国生<sup>1</sup>, 詹荣荣<sup>1</sup>, 张烈<sup>1</sup>

(1. 中国电力科学研究院有限公司继电保护研究所, 北京 100192; 2. 国网西藏电力有限公司检修公司, 西藏自治区 拉萨 857000)

**摘要:**继电保护系统故障树是保护系统危险性辨识和评价的重要工具。针对故障树顶级事件发生率难以精确获取、故障树不能进行反向推理等不足, 提出基于故障树和贝叶斯网络的继电保护故障风险评估方法: 正向上, 依据保护实时运行数据确定贝叶斯网络根节点(对应故障树基本事件)故障状态, 结合贝叶斯网络推理给出贝叶斯网络叶节点(对应故障树顶级事件)的故障概率, 实现保护系统的先验风险预测; 反向上, 由贝叶斯网络叶节点故障, 结合贝叶斯条件概率公式, 计算贝叶斯网络根节点的故障概率, 实现故障原因的后验定位及溯源。所提方法为提高保护系统可靠性和进行故障诊断提供依据。

**关键词:**故障树; 贝叶斯网络; 继电保护; 风险预测; 故障定位

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2021.04.011 中图分类号:TM731 文章编号:1673-9140(2021)04-0081-10

## Fault positioning and risk assessment method of relay protection based on fault tree and Bayesian network

WANG Wenhuan<sup>1</sup>, GUO Peng<sup>1</sup>, ZHU Jie<sup>2</sup>, YANG Guosheng<sup>1</sup>,  
ZHAN Rongrong<sup>1</sup>, ZHANG Lie<sup>1</sup>

(1. Relay Protection Research Institute, China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100192, China;  
2. Maintenance Company, State Grid Tibet Electric Power Co., Ltd., Lhasa 857000, China)

**Abstract:** The fault tree of the relay protection system is an important tool for risk identification and evaluation of the system. To solve the difficulty in precisely obtaining the top-level event rate of fault tree, and the inability of reverse reasoning of fault trees, a fault risk assessment method for relay protection which is based on the fault tree and the Bayesian network is proposed. In the positive direction, the fault state of the root nodes in the Bayesian network (corresponding to the basic event of the fault tree) can be confirmed according to the real-time operational data of relay protection. Combined with by the Bayesian network reasoning, the fault probability of the leaf node of Bayesian net-

收稿日期:2019-12-21; 修回日期:2020-09-08

基金项目:国家电网公司科技项目(5100-201955016A-0-0-00)

通信作者:郭鹏(1988-),男,博士,高级工程师,主要从事继电保护状态评价等研究;E-mail:guopeng1024@163.com

work (corresponding to the top event of the fault tree) can then be generated, thus to realize the risk prediction of the protection system. In the reserve direction, the leaf nodes of Bayesian network are combined with the Bayesian conditional probability formula, to calculate the failure probability of the root nodes of the Bayesian network, therefore the positioning and tracing of the fault cause can be achieved. The proposed method can provide bases for the reliability improvement and the fault diagnosis of the protection system.

**Key words:** fault tree; Bayesian network; relay protection; risk prediction; fault positioning

继电保护是电网安全运行的第一道防线,开展继电保护系统风险评估和故障定位研究对于及时发现继电保护系统安全隐患、提升电网安全运行能力具有重要意义。目前,围绕继电保护状态评价<sup>[1-11]</sup>开展了研究,在评价指标提取、指标权重和评价方法等方面取得了一定成果,并形成了企业标准《继电保护状态评价导则》<sup>[12]</sup>,实现了从不同角度对继电保护系统的全面评价,同时得到继电保护系统异常信息,能够为继电保护风险预警提供有价值的信息。文献<sup>[13]</sup>构建了继电保护系统故障树,通过逐层分析,能够确定故障发生的具体原因。然而,故障树分析方法不具备推断顶事件发生概率及风险程度的能力,也不具备反向推理获得底事件后验概率的能力。

近年来,贝叶斯网络在众多领域<sup>[14-21]</sup>的可靠性分析、失效概率计算、风险评估以及故障诊断方面取得了广泛的应用。贝叶斯网络允许变量具备多种状态,为刻画不同等级的风险创造条件;贝叶斯网络具备正向推理能力,能够依据底事件先验概率计算顶事件的发生概率,并且具备反向推理能力,能够在系统异常的条件下确定系统各种隐患发生的后验概率。

该文提出基于故障树及贝叶斯网络的继电保护系统风险评估及故障定位方法。首先,应用故障树擅长致因分析的优势,开展继电保护系统故障原因的逐层深入挖掘,构造继电保护系统故障树;然后,分析各种异常告警的严重程度,建立变量的多状态模型,使用条件概率分布表建立不同变量的条件概率关系,将故障树转化成贝叶斯网络;最后,推导继电保护系统发生不同程度异常告警的概率,以及系统发生异常告警条件下各异常告警事件的后验概率。

## 1 继电保护系统故障树

故障树采用树状的图形化形式将系统故障与部件失效关联起来,能够清晰描述故障的因果关系和推演路径。故障树以不希望发生的故障作为顶事件,将故障原因逐层推进,得到各层级的中间事件,继续推进直到不能再分解,即为底事件。使用故障树构建的模型网络结构清晰、关系明确,而采用概率统计转化成的贝叶斯网络则结构混杂,所以通常先建立故障树模型,再使用一定逻辑将故障树模型转化成贝叶斯网络模型。以文献<sup>[22]</sup>220 kV 线路单套保护系统为例,构造的继电保护系统的故障树如图 1 所示<sup>[23]</sup>。该系统包含的装置:合并单元 1→合并单元 2→线路保护→智能终端→母线保护。故障树中符号的含义如表 1 所示。

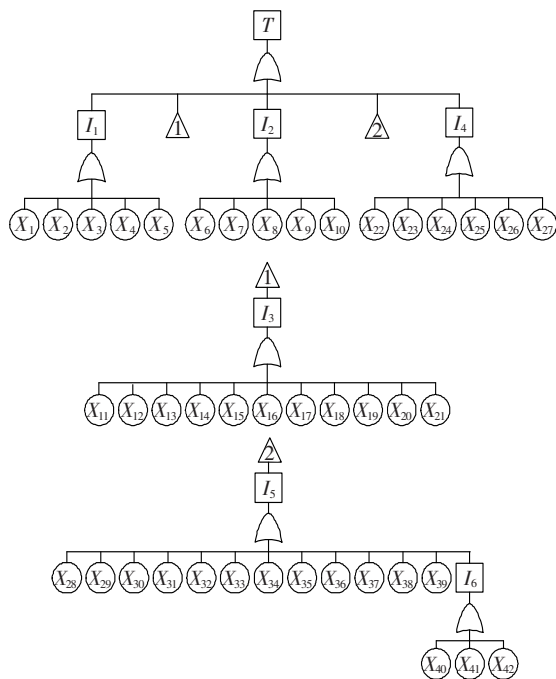


图 1 典型继电保护系统故障树

Figure 1 Typical fault tree of protection relay system

表 1 图 1 故障树中事件的含义

Table 1 Meaning of events in the fault tree

符号	事件	符号	事件
$T$	继电保护系统异常告警	$X_{21}, X_{25}, X_{38}$	检修不一致告警
$I_1$	母线合并单元异常告警	$X_{22}$	智能终端闭锁
$I_2$	线路合并单元异常告警	$X_{23}$	智能终端某 GOOSE 断链
$I_3$	线路保护异常告警	$X_{24}$	智能终端对时异常
$I_4$	智能终端异常告警	$X_{26}$	智能终端控制回路断线
$I_5$	母线保护异常告警	$X_{27}$	断路器压力异常
$X_1, X_6$	合并单元装置异常	$X_{28}$	母线保护装置闭锁
$X_2, X_7$	合并单元装置闭锁	$X_{29}$	母线保护装置失电告警
$X_3, X_8$	合并单元同步异常告警	$X_{30}$	母线保护某支路 SV 采样异常
$X_4, X_9$	合并单元检修状态	$X_{31}$	母线保护某支路 SV 中断
$X_5, X_{10}$	合并单元收智能终端 GOOSE 断链	$X_{32}$	母线保护某支路 TA 断线
$X_{11}$	线路保护装置闭锁	$X_{33}$	母线保护某母联/分段 TA 断线
$X_{12}$	线路保护装置失电告警	$X_{34}$	母线保护某段母线 TV 断线
$X_{13}$	线路保护 SV 采样异常	$X_{35}$	母线保护收智能终端 GOOSE 中断
$X_{14}$	线路保护收合并单元 SV 中断	$X_{36}$	母线保护收线路保护 GOOSE 中断
$X_{15}$	线路保护 TA 断线	$X_{37}$	母线保护开入、开出异常
$X_{16}$	线路保护 TV 断线	$X_{39}$	220 kV 母线互联
$X_{17}$	线路保护收智能终端 GOOSE 中断	$I_6$	母线保护运行异常
$X_{18}$	线路保护收母差 GOOSE 中断	$X_{40}$	母差隔离开关位置不对应
$X_{19}$	线路保护通道告警	$X_{41}$	失灵接点误启动
$X_{20}$	线路保护开入、开出异常	$X_{42}$	母联分段接点不对应

## 2 贝叶斯网络模型

### 2.1 贝叶斯网络

应用故障树能够通过逐层推演逐步查找故障原因。为了反映事件间的概率影响,计算事件发生的概率,可以通过构造与故障树对应的贝叶斯网络实现。当使用故障树对继电保护系统进行故障建模时,由于故障树通过逻辑门建立事件间的因果关系,事件只能具有 2 种状态“0”和“1”,无法区分继电保护系统运行告警的严重程度。贝叶斯网络使用条件概率来描述事件间的因果关系,允许事件具有多种状态(每种状态可对应一种风险程度),使得继电保护系统运行告警蕴含的风险程度信息得以描述出来。

贝叶斯网络是以概率论、图论为基础,构造的以节点、有向边、条件概率分布表为基本元素的有向无环图,如图 2 所示。贝叶斯网络的节点表示随机变量,有向边表示随机变量间直接的制约关系,其方向由起制约作用的节点指向受制的节点。施加影响的

节点称为父节点(如图 2 中的 A 为 C 的父节点),受制的节点称为子节点(如图 2 中 C 为 A 的子节点),将没有父节点的节点称为根节点(如图 2 中的 A、B、D),没有子节点的节点称为叶节点(如图 2 中的 E)。贝叶斯网络通过条件概率分布表来表达变量间的制约关系,一个含有 2 种状态“0”和“1”的贝叶斯网络的条件概率分布如表 2 所示。

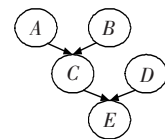


图 2 简单贝叶斯网络示意

Figure 2 Schematic diagram of a simple Bayesian network

表 2 条件概率分布表举例

Table 2 Example table of conditional probability distribution

条件	概率			
A	0	1		
B	0	1	0	1
C 发生	0	1	1	1
C 不发生	1	0	0	0

## 2.2 故障树向贝叶斯网络的转化

通过故障树转化成贝叶斯网络是构建贝叶斯网络的重要手段。故障树与贝叶斯网络结构具有相似性,故障树的顶、底、中间事件对应贝叶斯网络的叶、根、其他节点,故障树的逻辑门可转化成有向边,逻辑由条件概率分布表阐述。故障树中的事件仅有发生和不发生2种状态,为了反映装置异常告警严重程度的不同,对贝叶斯网络中节点建立多态模型,包括“严重异常”、“异常”、“正常”3种状态。根节点事实上仍仅有2种状态,即“发生异常”和“未发生异常”,当采用3状态建模时,在“严重异常”或“异常”2种状态中,与根节点异常告警的严重程度吻合的状态,其概率取为异常告警的先验概率;与根节点异常告警的严重程度不吻合的状态,其概率取为0;“正常”的概率为根节点异常告警不发生的概率。

贝叶斯网络的条件概率分布表的逻辑满足:

$$P(X = \text{严重异常}) = \begin{cases} 1, & \text{if } \exists p_a(X) \text{ 满足 } p_a(X) = \text{严重异常} \\ 0, & \text{其余} \end{cases} \quad (1)$$

$$P(X = \text{异常}) = \begin{cases} 1, & \text{if } \exists p_a(X) \text{ 满足 } p_a(X) = \text{异常, 且} \\ P(X = \text{严重异常}) = 0 \\ 0, & \text{其余} \end{cases} \quad (2)$$

$$P(X = \text{正常}) = 1 - P(X = \text{严重异常}) - P(X = \text{异常}) \quad (3)$$

其中,  $p_a(X)$  为  $X$  的父节点。

以用于线路继电保护装置失效概率分析的局部贝叶斯网络为例,假设  $A$  对应线路保护 TA 断线(一种严重异常)是否发生,  $B$  对应线路保护通道告警(一种普通异常)是否发生,  $C$  对应线路继电保护装置的状态。若线路保护 TA 断线、线路保护通道告警的先验概率分别为 0.1、0.2, 依据贝叶斯条件概率计算方法, 可得贝叶斯网络各节点不同状态的概率, 如图 3 所示。

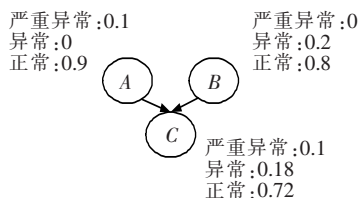


图3 贝叶斯网络概率计算举例

Figure 3 Calculation example of Bayesian network probability

## 2.3 继电保护异常告警根节点先验概率的确定

通过统计历史上同厂家、同型号装置发生的相同异常告警,确定某种继电保护异常告警的分布特性和参数,再根据待研究装置运行时间推算该异常告警的发生概率,作为贝叶斯网络根节点的先验概率。异常告警可能在样本的生命周期内未发生,试验数据具有随机截尾特性。假设样本数为  $n$ , 其中共有  $r$  个样本发生异常告警,发生时间为  $t_i$ , 即异常告警发生时间与装置投运时间之差,  $i=1, 2, \dots, r$ ; 共有  $k$  个样本未发生异常告警,  $c_j$  为此类样本的截尾时间,即样本退运时间与投运时间之差,  $j=1, 2, \dots, k$ 。前期研究表明,指数分布对于异常告警发生情况的拟合程度较高,异常告警发生的频度—失效率  $\lambda$  的最大似然估计为

$$\hat{\lambda} = \frac{r}{\sum_{i=1}^r t_i + \sum_{j=1}^k c_j} \quad (4)$$

对于同厂家、同型号装置历史上未发生的异常告警,根节点处于正常状态的概率为 1, 将其从贝叶斯网络剔除。失效率的取值为

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda(t-t_1)} \quad (5)$$

式中  $t$  为当前时间;  $t_1$  为装置投运时间、上次全检时间以及上次相同异常告警事件发生时间的最大值。

## 2.4 继电保护系统风险评估与故障定位

继电保护系统异常程度越大,继电保护系统风险越大;发生异常告警的概率越大,风险也越大。继电保护的风险  $R$  可用发生异常告警的可能性  $P$  与严重程度  $S$  的乘积表示。 $P$  通过异常告警的概率体现,  $S$  通过“严重异常”、“异常”、“正常”3种状态体现。

贝叶斯网络子节点  $X$  处于状态  $X^i$  ( $i=1, 2, 3$ ) 的概率为

$$P(X = X^i) = \sum P(y_1, y_2, \dots, y_m; X = X^i) = \sum_{y_1, y_2, \dots, y_m} [P(X = X^i | y_1 = y_1^{i_1}, y_2 = y_2^{i_2}, \dots, y_m = y_m^{i_m}) \cdots P(y_1 = y_1^{i_1}) P(y_2 = y_2^{i_2}) \cdots P(y_m = y_m^{i_m})] \quad (6)$$

式中  $y_1, y_2, \dots, y_m$  为  $X$  的父节点;  $P(y_1 = y_1^{i_1})$  为变量  $y_1$  取  $y_1^{i_1}$  的概率;  $P(X = X^i | y_1 = y_1^{i_1}, y_2 = y_2^{i_2}, \dots, y_m = y_m^{i_m})$  依据条件概率分布表, 如式(1)~(3)所示。

选用根节点作为父节点,由根节点的先验概率、式(6)计算其子节点的条件概率;再以新获得条件概率的节点为父节点,选取其子节点,由式(6)计算条件概率。按照此步骤依次进行计算,直至得到叶节点处于不同状态下的概率,完成继电保护系统风险评估。

在已知叶节点  $T$  的状态  $T^i (i=1,2,3)$  条件下,使用贝叶斯公式计算根节点  $Z_j (j=1,2,\dots,n)$  所处状态  $Z_j^k$  的概率为

$$P(Z_j = Z_j^k | T = T^i) = \frac{P(Z_j = Z_j^k, T = T^i)}{P(T = T^i)} \quad (7)$$

其中,  $P(Z_j = Z_j^k, T = T^i)$  为根节点  $Z_j$  处于状态  $Z_j^k$  且叶节点  $T$  的状态为  $T^i$  的概率。应用式(7)计算得到根节点  $Z_j$  的后验概率,实现继电保护系统故障定位。

计算故障诊断准确率  $P$ , 即

$$P = \frac{N_{TP}}{N_{TP} + N_{FP}} \times 100\% \quad (8)$$

式中  $N_{TP}$  指诊断正确的案例数;  $N_{FP}$  指诊断错误的案例数。

继电保护系统风险评估及故障定位流程如图 4 所示,具体步骤:

- 1) 从继电保护系统故障出发,将故障原因逐层推进,获得继电保护系统故障树;
- 2) 将故障树的事件转化成变量,赋予变量“严重异常”、“异常”、“正常”3 种状态;
- 3) 故障树的顶、底、中间事件分别转化成贝叶斯网络的叶、根、其他节点,依据式(1)~(3)确定条件概率分布表,构造贝叶斯网络;
- 4) 依据式(4)、(5)确定根节点的先验概率,使用式(6)依次计算非根节点的条件概率,最后,求出叶节点处于不同状态下的概率,完成继电保护系统风险评估;
- 5) 依据叶节点的状态,使用贝叶斯公式计算根节点所处状态的后验概率,完成继电保护系统故障定位;
- 6) 随着历史数据库的扩充、完善,根据式(4)、(5)更新调整根节点的先验概率以及式(7)中的条件概率  $P(Z_j = Z_j^k, T = T^i)$ 。

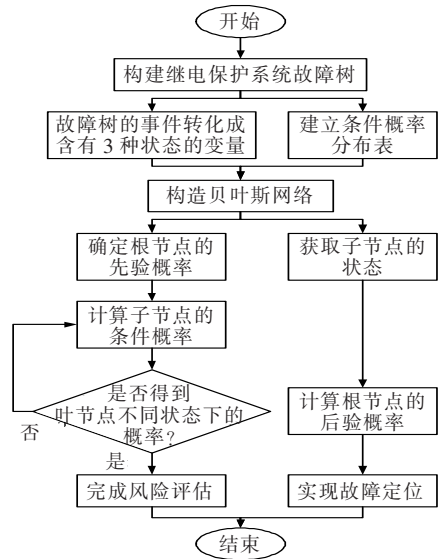


图 4 继电保护系统风险评估及故障定位流程  
Figure 4 Flow chart of risk assessment and fault positioning for protection relay system

### 3 算例分析

#### 3.1 算例 1

以某 220 kV 线路单套保护系统为研究对象,系统的异常告警故障树见图 1。选取历史异常告警信息上报充分的同厂家、同型号装置,将其各种异常告警事件及其发生时间作为样本,应用式(4)计算装置发生各种异常告警的失效率  $\lambda$ ,应用式(5)计算装置当前运行时间下各种异常告警的发生概率(对于历史上未发生的某种异常告警,将不在贝叶斯网络中出现)。根据装置各种异常告警的严重程度及发生率,确定与故障树中异常告警底事件对应的贝叶斯网络根节点各种状态的先验概率,依据式(1)~(3)确定贝叶斯网络条件概率分布表,将故障树转换成贝叶斯网络,如图 5 所示;220 kV 保护系统各种异常告警的发生概率及严重程度如表 3 所示。

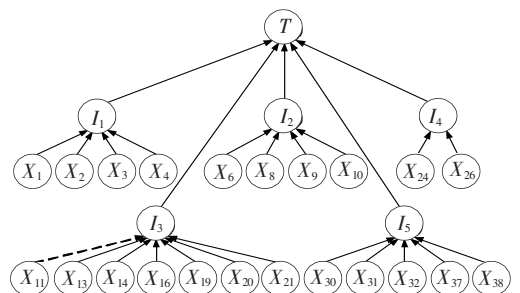


图 5 220 kV 保护系统贝叶斯网络  
Figure 5 Bayesian network of 220 kV protection relay system

**表 3** 220 kV 保护系统各种异常告警的发生概率及严重程度

**Table 3** Probability and severity of various abnormal events in 220 kV protection system

节点	事件	严重程度	先验概率/ $10^{-6}$
X <sub>1</sub>	合并单元装置异常	普通	11.23
X <sub>2</sub>	合并单元装置闭锁	严重	0.54
X <sub>3</sub>	合并单元同步异常告警	普通	3.29
X <sub>4</sub>	合并单元检修状态	普通	1.64
X <sub>5</sub>	合并单元收智能终端 GOOSE 断链	普通	0.00
X <sub>6</sub>	合并单元装置异常	普通	9.76
X <sub>7</sub>	合并单元装置闭锁	严重	0.00
X <sub>8</sub>	合并单元同步异常告警	普通	2.46
X <sub>9</sub>	合并单元检修状态	普通	1.33
X <sub>10</sub>	合并单元收智能终端 GOOSE 断链	普通	0.33
X <sub>11</sub>	线路保护装置闭锁	严重	0.00
X <sub>12</sub>	线路保护装置失电告警	严重	0.00
X <sub>13</sub>	线路保护 SV 采样异常	严重	0.71
X <sub>14</sub>	线路保护收合并单元 SV 中断	严重	0.59
X <sub>15</sub>	线路保护 TA 断线	普通	0.00
X <sub>16</sub>	线路保护 TV 断线	普通	1.78
X <sub>17</sub>	线路保护收智能终端 GOOSE 中断	普通	0.00
X <sub>18</sub>	线路保护收母差 GOOSE 中断	普通	0.00
X <sub>19</sub>	线路保护通道告警	普通	3.26
X <sub>20</sub>	线路保护开入、开出异常	普通	4.11
X <sub>21</sub>	检修不一致告警	普通	2.93
X <sub>22</sub>	智能终端闭锁	严重	0.00
X <sub>23</sub>	智能终端某 GOOSE 断链	普通	0.00
X <sub>24</sub>	智能终端对时异常	普通	1.11
X <sub>25</sub>	检修不一致告警	普通	0.00
X <sub>26</sub>	智能终端控制回路断线	严重	0.66
X <sub>27</sub>	断路器压力异常	严重	0.00
X <sub>28</sub>	母线保护装置闭锁	严重	0.00
X <sub>29</sub>	母线保护装置失电告警	严重	0.00
X <sub>30</sub>	母线保护某支路 SV 采样异常	严重	0.44
X <sub>31</sub>	母线保护某支路 SV 中断	严重	0.26
X <sub>32</sub>	母线保护某支路 TA 断线	普通	0.59
X <sub>33</sub>	母线保护某母联/分段 TA 断线	普通	0.00
X <sub>34</sub>	母线保护某段母线 TV 断线	普通	0.00
X <sub>35</sub>	母线保护收智能终端 GOOSE 中断	普通	0.00
X <sub>36</sub>	母线保护收线路保护 GOOSE 中断	普通	0.00
X <sub>37</sub>	母线保护开入、开出异常	普通	1.26
X <sub>38</sub>	检修不一致告警	普通	3.41
X <sub>39</sub>	220 kV 母线互联	普通	0.00
X <sub>40</sub>	母差隔离开关位置不对应	普通	0.00
X <sub>41</sub>	失灵接点误启动	普通	0.00
X <sub>42</sub>	母联分段接点不对应	普通	0.00

从贝叶斯网络根节点( $X_1 \sim X_{42}$ )的先验概率出发,依次计算网络非根节点( $I_1 \sim I_6$ )在不同状态下的条件概率,最后得出叶节点  $T$  的条件概率。计算结果如表 4 所示。计算结果确定了叶节点,即 220 kV 线路单套保护系统发生严重异常的概率为  $3.2 \times 10^{-6}$ ,发生普通异常的概率为  $47.49 \times 10^{-6}$ ,实现了继电保护系统风险评估。

在某时刻,该 220 kV 保护系统发生严重异常,式(7)中分子即根节点与叶节点均处于严重异常状态的概率如表 5 所示。式(7)分母即系统处于严重异常状态的概率为  $3.2 \times 10^{-6}$ ,据此可计算叶节点发生严重异常条件下根节点出现严重异常的后验概率。依据表 5,能够确定不同的异常告警发生的可能性,以便确定排查的先后顺序。对于表 3 中严重程度为普通或先验概率为 0 的异常告警,由于根节点状态为严重异常的概率为 0,所以不出现在表 5 中。

**表 4** 贝叶斯网络非根节点的发生概率

**Table 4** Probability of non-root nodes in

节点	Bayesian network			$10^{-6}$
	不同状态下的条件概率			
	严重	普通	正常	
$I_1$	0.54	16.16	999 983.30	
$I_2$	0.00	13.88	999 986.12	
$I_3$	1.30	12.08	999 986.62	
$I_4$	0.66	0.11	999 999.23	
$I_5$	0.70	5.26	999 994.04	
$I_6$	0.00	0.00	1 000 000.00	
$T$	3.20	47.49	999 949.31	

**表 5** 叶节点发生严重异常条件下根节点处于严重异常状态的后验概率

**Table 5** Posterior probability of the root node under the condition that the leaf node in a severe abnormal state

节点	式(7)分子/ $10^{-6}$	后验概率/%
X <sub>2</sub>	0.54	16.9
X <sub>13</sub>	0.71	22.2
X <sub>14</sub>	0.59	18.4
X <sub>26</sub>	0.66	20.6
X <sub>30</sub>	0.44	13.8
X <sub>31</sub>	0.26	8.1

若近期与该 220 kV 保护系统线路保护装置同厂家、同型号的一套装置(非本系统中的保护装置)发生  $X_{11}$  装置闭锁,该型号装置异常告警样本库中增加此次告警信息,修正不同异常告警的失效率  $\lambda$ 。其他异常告警的先验概率不变,  $X_{11}$  的先验概率经计算变为  $0.77 \times 10^{-6}$ ,在贝叶斯网络中增加  $X_{11}$  节点,如图 5 虚线所示,重新计算贝叶斯网络非根节点的发生概率(如表 6 所示),以及系统发生严重异常条件下根节点的后验概率,结果如表 7 所示。

表 6  $X_{11}$  装置闭锁下贝叶斯网络非根节点的发生概率

**Table 6** Probability of non-root nodes in Bayesian network of  $X_{11}$  device locked  $10^{-6}$

节点	不同状态下的条件概率		
	严重	普通	正常
$I_1$	0.54	16.16	999 983.30
$I_2$	0.00	13.88	999 986.12
$I_3$	2.07	12.08	999 985.85
$I_4$	0.66	0.11	999 999.23
$I_5$	0.70	5.26	999 994.04
$I_6$	0.00	0.00	1 000 000.00
$T$	3.97	47.49	999 948.54

表 7  $X_{11}$  装置闭锁且叶节点发生严重异常条件下根节点处于严重异常状态的后验概率

**Table 1** Posterior probability of the root node under the condition that the leaf node in a severe abnormal state while the root nodes are also in a severe abnormal state when  $X_{11}$  device is locked

节点	式(7)分子/( $10^{-6}$ )	后验概率/%
$X_2$	0.54	13.6
$X_{11}$	0.77	19.4
$X_{13}$	0.71	17.9
$X_{14}$	0.59	14.9
$X_{26}$	0.66	16.6
$X_{30}$	0.44	11.1
$X_{31}$	0.26	6.5

在发生同厂家、同型号线路保护装置闭锁告警前,计算得到根节点  $X_{11}$  异常告警的先验概率为 0,贝叶斯网络中剔除了该节点;在发生线路保护装置闭锁告警并将其纳入样本库后,重新计算  $X_{11}$  的先验概率变为  $0.77 \times 10^{-6}$ ,根节点  $X_{11}$  重新添加进贝

叶斯网络中。 $X_{11}$  先验概率的变化导致其子节点  $I_3$  以及贝叶斯网络叶节点  $T$  处于严重异常状态的概率增加;叶节点发生严重异常条件下各根节点处于严重异常状态的后验概率也发生变化。

此外,故障树分析方法无法计算继电保护系统异常告警顶事件的发生概率,故障树分析使用逻辑门建立事件间的因果关系,事件仅具有 0 和 1 这 2 种状态,使得无法对顶事件严重程度进行评估。使用故障树分析方法也无法在系统发生异常条件下判断不同底事件发生的概率。

### 3.2 算例 2

贝叶斯网络能够应用于继电保护缺陷诊断。从继电保护缺陷记录的详细描述中提取缺陷典型现象。继电保护装置本体缺陷典型现象及对应词汇如表 8 所示。表中“+”号表示在“+”前、后的特征词均出现在缺陷描述中。

表 8 继电保护装置本体故障典型现象的对应词汇

**Table 8** Vocabulary of typical defects of protection relay device

典型现象	特征词
采样无效、采样+中断、采样异常、数据异常、开出异常、开出无响应、模拟量+采集不到、开关量+采集不到、无采样、看不到采样值、双 AD 采样异常、采样精度偏差+大、开入输入不正常、AD 错误、无+电压、无+电流、电压+0、电流+0、SV 品质异常、电流异常、电压异常、SV 数据中断、采样+出错、交流异常、开入+异常	运行灯闪、运行灯+灭、运行灯+不亮、运行灯熄灭、运行指示灯灭
采样出错	闭锁、CPU 退出、保护功能退出
运行灯灭	直流消失、失电、电源脱扣、电源消失、无电源、掉电、电源消失
设备闭锁	数据总线中断、通讯故障、A 网中断、B 网中断、网络 A 故障、网络 B 故障、A、B 网通讯中断、内部联络异常、联络+异常、通讯出错、网络 A、B 异常、网络+异常、通讯+中断、通信+中断
设备失电	RAM 出错、无法存储、闪存错误、EEPROM 错误、E <sup>2</sup> PROM 错误、EPROM 错误、内存堵塞、DRAM 异常
设备内部通讯中断	24V 灯熄灭、电源指示灯+闪、电源灯+灭、电源输出降低
RAM 出错	
电源指示灯灭	

由缺陷部位及缺陷原因字段能够确定缺陷是否由装置板卡损坏引起。从缺陷描述字段提取装置配置错误导致的缺陷,特征词:升级、整定+错、版本+低、漏洞。

从2010—2019年继电保护缺陷历史数据中提取符合表8典型现象特征词的缺陷记录,统计结果如表9所示,首行是4种缺陷原因的计数以及总数,其他7行是表8所列举的各典型现象与不同缺陷原因对应的统计数以及总数。

表9 缺陷现象与原因统计

Table 9 Summary of defect phenomenon and cause

统计数	电源板坏	CPU或管理板坏	采样、开入开出板坏	配置错误	总数
计数	605	595	109	141	1 450
采样出错	75	123	89	35	322
运行灯灭	270	227	10	24	531
设备闭锁	98	206	18	41	363
设备失电	146	11	2	1	160
设备内部通讯中断	69	162	6	71	308
RAM出错	6	26	0	3	35
电源指示灯灭	136	2	4	0	142

某次缺陷的现象是“运行灯灭”&“设备内部通讯中断”。考虑现场仅上报部分缺陷信息,现场未填报的缺陷现象有可能未发生,也有可能发生了但未填报,所以在使用式(7)计算各缺陷原因的后验概率时,式(7)分子仅包含观测到的现象对应的条件概率的连乘,不包含未观测到的现象对应的条件概率的连乘。

在该案例中,式(7)的分子  $P(Z_j = Z_j^{k_j}, T = T^i)$  中  $T^i$  为吻合的缺陷现象,即“运行灯灭”&“设备内部通讯中断”;  $Z_j = Z_j^{k_j}$  为待判断的缺陷原因。当  $Z_j^{k_j}$  为“电源板坏”时,式(7)的分子应为  $P(\text{电源板坏})P(\text{运行灯灭}|\text{电源板坏})P(\text{设备内部通讯中断}|\text{电源板坏}) = \frac{605}{1\,450} \times \frac{270}{605} \times \frac{69}{605} = 0.021\,2$ ; 当  $Z_j^{k_j}$  分别为“CPU或管理板坏”、“采样、开入开出板坏”、“配置错误”时,式(7)分子分别为0.042 6、0.000 4、0.008 3,式(7)分母为  $0.021\,2 + 0.042\,6 + 0.000\,4 + 0.008\,3 = 0.072\,6$ 。据此,可应用式(7)计算缺陷原因为“电源板坏”、“CPU或管理板坏”、“采

样、开入开出板坏”、“配置错误”的后验概率,分别为29.26%、58.73%、0.52%、11.48%,诊断结论为“CPU或管理板坏”,与实际缺陷原因即管理板坏吻合。

另一次缺陷的现象是“运行灯灭”、“设备闭锁”、“电源指示灯灭”。由式(7)计算缺陷原因为“电源板坏”、“CPU或管理板坏”、“采样、开入开出板坏”、“配置错误”的后验概率分别为96.8%、2.6%、0.6%、0%,诊断结论为“电源板坏”,与实际缺陷原因即电源板坏吻合。

以1 450条含有表8中7项典型特征的新缺陷作为测试样本,使用式(7)计算后验概率,后验概率最大的缺陷原因作为首选原因,后验概率的第二大值作为第二原因,以此类推。按照后验概率的大小确定缺陷排查顺序,并与实际缺陷原因对照。首选原因准确的数目是899例(62%),首选原因或第二原因准确的数目是1 276例(88%)。

## 4 结语

该文应用故障树和贝叶斯网络实现了继电保护系统风险评估和故障定位。应用故障树的致因分析能力建立了继电保护系统故障多层体系,结构清晰、关系明确,通过将故障树转化成贝叶斯网络,完成对异常告警严重程度和概率的建模,并使用条件概率分布表和贝叶斯公式计算继电保护系统异常的概率,实现风险评估,同时,提出了在继电保护系统发生不同严重故障的故障条件下,各种异常发生的后验概率,实现故障定位。该文所提方法能够显著提升继电保护系统分析评价水平。

## 参考文献:

- [1] 杨国生,戴飞扬,王文焕,等.基于灰度关联法和TOPSIS法的继电保护状态评估综合算法研究与应用[J].中国电力,2019,52(2):94-103.  
YANG Guosheng, DAI Feiyang, WANG Wenhuan, et al. Research and application of comprehensive algorithm of relay protection status assessment based on gray correlation analysis and TOPSIS method[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 94-103.
- [2] 刘宇阳,龚庆武,梁志远.基于改进GO法的继电保护系



- 统可靠性分析[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(4): 129-135.
- LIU Yuyang, GONG Qingwu, LIANG Zhiyuan. Reliability analysis for protection system with the advanced GO method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(4): 129-135.
- [3] 叶远波, 刘宏君, 张兆云, 等. 基于广域信息的继电保护实时评价研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 150-157.
- YE Yuanbo, LIU Hongjun, ZHANG Zhaoyun, et al. Research on real-time evaluation of relay protection based on wide area information[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13): 150-157.
- [4] 徐长宝, 王玉磊, 赵立进, 等. 基于信息趋势预测和组合赋权的智能变电站继电保护系统状态模糊综合评价[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 162-168.
- XU Changbao, WANG Yulei, ZHAO Lijin, et al. Fuzzy comprehensive evaluation of intelligent substation relay protection system state based on information trend prediction and combination weighting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 162-168.
- [5] 何云良, 裘愉涛, 吴路明, 等. 基于 5G 通信的继电保护技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(7): 31-38.
- HE Yunliang, QIU Yutao, WU Luming, et al. Research on relay protection based on 5G communication technology[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(7): 31-38.
- [6] 龙翩翩, 蔡泽祥, 张延旭, 等. 智能变电站继电保护信息交互失效模型与薄弱环节分析[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(1): 29-36.
- LONG Pianpian, CAI Zexiang, ZHANG Yanxu, et al. Analysis of failure mode and weak points for relay protection information interaction in smart substation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(1): 29-36.
- [7] 杨建新, 王一栋, 刘东英. 330 kV 变电站主变继电保护系统及自动灭火系统的设计和实现[J]. 电网与清洁能源, 2019, 35(11): 1-6.
- YANG Jianxin, WANG Yidong, LIU Dongying. Design and implementation of main transformer relay protection system and automatic fire extinguishing system for 330 kV substations[J]. Power System and Clean Energy, 2019, 35(11): 1-6.
- [8] 彭云豪, 董希建, 周海强, 等. 电网安全稳定控制系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 123-131.
- PENG Yunhao, DONG Xijian, ZHOU Haiqiang, et al. Reliability evaluation of power grid security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 123-131.
- [9] 徐长宝, 文屹, 龚庆武, 等. 基于云推理的线路保护装置故障率预测方法[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 83-91.
- XU Changbao, WEN Yi, GONG Qingwu, et al. Cloud reasoning based method for predicting failure rate of transmission line protection equipment[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017, 32(2): 83-91.
- [10] 侯艾君. 继电保护状态评价方法及其在检修决策中的应用[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
- [11] 徐长宝, 赵立进, 高吉普, 等. 基于灰色马尔科夫链的继电保护装置寿命研究[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 114-119.
- XU Changbao, ZHAO Lijin, GAO Jipu, et al. Research of relay protection device life cycle based on gray Markov model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 114-119.
- [12] Q/GDW 11285—2014. 继电保护状态评价导则[S].
- [13] 苏永春, 陈忻磊, 张沛超, 等. 基于 HAZOP 分析的数字化工厂故障树建立方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 1-5.
- SU Yongchun, CHEN Xinlei, ZHANG Peichao, et al. A fault tree constructing method based on HAZOP analysis for digital substations[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(6): 1-5.
- [14] 张露江, 张利, 杨要伟, 等. 基于改进贝叶斯网络的风机齿轮箱自动诊断策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(19): 145-151.
- ZHANG Lujiang, ZHANG Li, YANG Yaowei, et al. Research on automatic diagnosis strategy of wind turbine gearbox based on improved Bayesian network[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(19): 145-151.
- [15] 王达梦, 马志勇, 柳亦兵, 等. 小故障样本条件下的风电机组分层贝叶斯可靠性模型[J]. 中国电力, 2019, 52(12): 97-104.
- WANG Dameng, MA Zhiyong, LIU Yibing, et al. Hi-

- erarchical Bayesian reliability model for wind turbines with small fault sample sets[J]. *Electric Power*, 2019, 52(12): 97-104.
- [16] 翁月莹,陈翔宇,肖新华,等. 基于 PSO 和贝叶斯分类器的配电网高阻接地故障识别技术[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(2): 52-56.
- WENG Yueying, CHEN Xiangyu, XIAO Xinhua, et al. High impedance fault detection based on PSO and bayes classifier[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(2): 52-56.
- [17] 陈景文,褚恩亮,李英春,等. 基于贝叶斯分类器的谐振接地故障选线系统设计[J]. *智慧电力*, 2019, 47(8): 99-104+119.
- CHEN Jingwen, CHU Enliang, LI Yingchun, et al. Design of resonant ground fault line selection system based on bayesian classifier[J]. *Smart Power*, 2019, 47(8): 99-104+119.
- [18] 李一泉,焦邵麟,曾耿晖,等. 基于贝叶斯网络的电网复杂故障推演新方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(4): 57-63.
- LI Yiquan, JIAO Shaolin, ZENG Genghui, et al. A new method to deduce complex fault of power grid based on Bayesian network[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(4): 57-63.
- [19] 黄建华,杨思,吴波. 基于贝叶斯网络的基坑围护工程施工风险评估[J]. *武汉大学学报(工学版)*, 2016, 49(5): 733-739.
- HUANG Jianhua, YANG Si, WU Bo. Construction risk assessment of foundation pit engineering based on methods of Bayesian network[J]. *Engineering Journal of Wuhan University*, 2016, 49(5): 733-739.
- [20] 蔡嘉,江修波. 基于贝叶斯算法的 220 kV 变压器故障检修成本模型分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2013, 28(4): 15-18.
- CAI Jia, JIANG Xiubo. Bayesian econometrics method based maintenance cost model for 220 kV transformers [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2013, 28(4): 15-18.
- [21] 吴晋媛,夏国强,李通,等. 基于时域介电法和动态贝叶斯网络的变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. *高压电器*, 2019, 55(10): 196-203.
- WU Jinyuan, XIA Guoqiang, LI Tong, et al. Evaluation of the aging state of transformer oil-paper insulation based on time domain dielectric method and dynamic Bayesian network[J]. *High Voltage Apparatus*, 2019, 55(10): 196-203.
- [22] 张友强,王洪斌,刁兴华,等. 计及保护失效的智能变电站二次系统综合风险评估研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(22): 155-163.
- ZHANG Youqiang, WANG Hongbin, DIAO Xinghua, et al. Integrated risk assessment of intelligent substation secondary system considering the protection failure[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(22): 155-163.
- [23] 刘宏新. 智能变电站二次系统运行与维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2016: 75-76.