

# 基于贝叶斯网的分布式电网故障诊断方法

周曙, 王晓茹, 钱清泉

(西南交通大学 电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

## Bayesian Networks Based Distributed Fault Diagnosis Approach for Power Grids

ZHOU Shu, WANG Xiaoru, QIAN Qingquan

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

**ABSTRACT:** A Leaky Noisy-Or Bayesian network-based dynamic modeling approach, in which actuating signal of measuring element of network protection is taken as diagnosis evidence, is presented for distributed fault diagnosis in power system. In allusion to the probability parameter calculation in diagnosis model, an a priori probability calculation method for event sampling is proposed. For the problem of using local information to implement distributed fault diagnosis of power network, the Leaky Noisy-Or nodal model is derived and two ratiocinations are given to prove the feasibility of this distributed method. By use of gradual exclusion, the element diagnosis model and combined diagnosis model are dynamically built, and through reasoning computation the fault diagnosis of power network is implemented. Calculation examples prove that the proposed method is correct and available.

**KEY WORDS:** power system; distributed fault diagnosis; Bayesian network; probability parameter; reasoning computation

**摘要:** 基于 Leaky Noisy-Or 贝叶斯网进行动态建模, 提出了一种分布式电网故障诊断方法。该方法采用电网保护测量元件动作信号作为诊断证据。针对诊断模型中的概率参数计算问题, 提出了一种事件采样的先验概率计算方法。针对利用局部信息实现分布式电网故障诊断的问题, 对 Leaky Noisy-Or 节点模型进行推导, 给出了 2 个推理, 证明了该分布式方法的可行性。采用逐步排除的方式, 动态建立了元件诊断模型和联合诊断模型, 通过推理计算实现了电网故障诊断。算例证明了该方法的正确性和有效性。

**关键词:** 电力系统; 分布式故障诊断; 贝叶斯网; 概率参数; 推理计算

## 0 引言

电网故障诊断对于确保电网安全稳定可靠运

行起着重要的作用。电网事故后的快速恢复、广域后备保护<sup>[1-3]</sup>的故障切除、连锁跳闸事故的预防等都离不开故障诊断。不同故障诊断的应用对诊断速度的要求也不一样, 广域后备保护要求诊断在传统后备保护动作之前完成, 而电网事故后的恢复对诊断时间的要求则宽松得多。为实现准确、实时的故障诊断, 需要在诊断模型的复杂度、诊断模型与实际情况的契合度、证据信息的完备性和证据信息获取的实时性之间进行衡量。

故障诊断就是通过观察到的信息, 对系统的故障状态进行估计。诊断结果的准确率取决于诊断方法对系统故障的认知程度。电网故障诊断方法主要有神经网络<sup>[4]</sup>、专家系统<sup>[5]</sup>、优化算法<sup>[6-7]</sup>、Petri 网<sup>[8]</sup>以及贝叶斯网方法<sup>[9]</sup>。由于缺乏大量实际的故障样本数据, 特别是对于具体的电网元件和保护装置, 基于机器学习的方法在实际应用中存在着较大的困难。为了处理故障诊断中的不确定性问题, 很多融合了概率的方法应运而生。文献[7]在用优化算法进行故障诊断时, 采用了一种计算元件故障先验概率和保护误动概率的方法, 但其计算公式中时间参数的选择缺乏一个意义明确的标准。

作为一种不确定性的推理方法, 贝叶斯网络具有严格的概率理论基础, 用图形化的方法来表示知识, 以条件概率表示变量之间影响的程度, 非常适合解决不确定性的知识表达和推理问题。然而电网结构复杂、覆盖地域广、所含元件多, 诊断建模和推理计算具有一定难度, 分布式诊断是一个好的解决方案。集中式诊断与全局信息相关联, 而分布式诊断与局部信息相关联。分布式诊断具有下列优点: 能够获得更丰富的本地化信息; 能够实现更快速的诊断; 具有较强的鲁棒性。在分布式诊断中需要解决这样一个关键性问题: 如何通过对局部信息

基金项目: 国家自然科学基金项目(90610026, 50937002)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (90610026, 50937002).

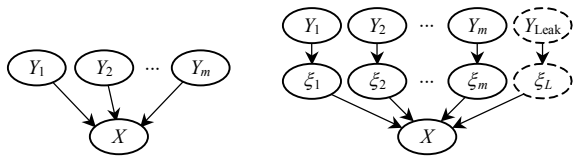
的观察、局部诊断模块间的互动,来实现全网的故障诊断。文献[9]提出了基于元件的故障诊断模型,将元件模型从电网中独立出来,但是没有对元件之间的条件相关性进行讨论。

由于电网故障后几个周波内可获得高冗余度的保护测量元件动作信号,本文采用保护测量元件动作信号作为电网故障诊断证据(下文“保护动作”皆指“保护测量元件的动作”),提出一种基于 Leaky Noisy-Or 贝叶斯网<sup>[10]</sup>动态建模的分布式电网故障诊断方法。针对诊断模型中的概率参数计算问题,本文提出一种事件采样的先验概率计算方法。针对利用局部信息实现分布式电网故障诊断的问题,对 Leaky Noisy-Or 节点模型进行推导,给出 2 个推理,证明该分布式方法的可行性,并采用逐步排除的方式,动态建立元件诊断模型和联合诊断模型,通过推理计算实现电网故障诊断。

### 1 Leaky Noisy-Or 节点模型

贝叶斯网中的 Noisy-Or 节点是逻辑“或”的泛化,而 Leaky Noisy-Or 节点是对 Noisy-Or 节点的扩展,当所有的父节点都取假时,该节点仍有可能取真。Leaky Noisy-Or 节点模型大大减少了参数的数量,降低了推理计算的复杂度。

Leaky Noisy-Or 节点模型见图 1。图中  $Y_1, \dots, Y_m$  是  $X$  的父节点,独立地影响  $X$ 。 $\xi_i (1 \leq i \leq m)$  与  $X$  有共同状态空间,它表示由  $Y_i$  独立引起  $X$  为真的原因因子。当且仅当  $Y_i$  为真,  $X$  为真,并且  $X$  为真是由  $Y_i$  为真引起的时,  $\xi_i$  为真。



(a) 二值 Leaky Noisy-Or 贝叶斯网 (b) 图 1(a)的因果机制独立示意

图 1 Leaky Noisy-Or 节点模型  
Fig. 1 A Leaky Noisy-Or model

$X$  的取值由各原因因子  $\xi_i$  的“或”决定:

$$X = \xi_1 \vee \xi_2 \vee \dots \vee \xi_m \vee \xi_L \quad (1)$$

$Y_{Leak}$  是隐性节点,它表示所有父节点取假时,  $X$  仍有可能为真,即

$$P(\xi_L = 1 | Y_{Leak} = 1) = P(X = 1 | Y_1 = 0, Y_2 = 0, \dots, Y_m = 0)$$

由  $Y_i$  独立引起  $X$  为真的概率为

$$P(\xi_i = 1 | Y_i = 1) =$$

$$P(X = 1 | Y_1 = 0, \dots, Y_i = 1, \dots, Y_m = 0, Y_{Leak} = 0)$$

$X$  的条件概率分布可由其原因因子的运算获

得,即

$$P(X | Y_1, \dots, Y_m) = \sum_{X = \xi_1 \vee \dots \vee \xi_L} P(\xi_1 | Y_1) \dots P(\xi_m | Y_m) P(\xi_L | Y_{Leak})$$

为了证明下文分布式诊断方法的可行性,本文对 Leaky Noisy-Or 节点模型进行推导,得到 2 个推理。

**推理 1:**  $X$  是 Leaky Noisy-Or 节点,如果  $X$  未知时,其父节点相互独立,那么  $X$  取假时,其父节点也相互独立。

$X$  取假时,由式(1)可知,其原因因子皆为假,根据贝叶斯网的条件独立性判定原则,  $X$  的原因因子  $d$ -分隔( $d$ -separation)其父节点,因此得证当  $X$  取假时,其父节点相互独立。

**推理 2:**  $X$  是 Leaky Noisy-Or 节点,其父节点为  $Y_1, \dots, Y_m$ ,在其原因因子概率  $P(\xi_i = 1 | Y_i = 1) (1 \leq i \leq m)$  和  $P(\xi_L = 1 | Y_{Leak} = 1)$  不变的情况下,为  $X$  引入一个新的父节点  $Y_{m+1}$ ,  $P(\xi_{m+1} = 1 | Y_{m+1} = 1)$  不等于 0。那么  $X$  取真时,  $Y_i (1 \leq i \leq m)$  取真的后验概率减小。

由于当且仅当  $Y_i$  为真,  $X$  为真,并且  $X$  为真是由  $Y_i$  为真引起的时,  $\xi_i$  为真。可知  $P(\xi_i = 1 | Y_i = 1) = 1$ ,  $P(X = 1 | \xi_i = 1) = 1$ , 进而得出

$$\begin{aligned} P(Y_i = 1 | X = 1) &= P(Y_i = 1, \xi_i = 0 | X = 1) + \\ &P(Y_i = 1, \xi_i = 1 | X = 1) = P(Y_i = 1 | \xi_i = 0) \cdot \\ &P(\xi_i = 0 | X = 1) + P(Y_i = 1 | \xi_i = 1) \cdot \\ &P(\xi_i = 1 | X = 1) = P(Y_i = 1 | \xi_i = 0) + \\ &[1 - P(Y_i = 1 | \xi_i = 0)] P(\xi_i = 1 | X = 1) \quad (2) \end{aligned}$$

式中:  $P(\xi_i = 1 | X = 1) = P(X = 1 | \xi_i = 1) P(\xi_i = 1) / P(X = 1) = P(\xi_i = 1) / P(X = 1)$ 。由于原概率参数不变,引入新的父节点后,  $X$  取真的先验概率  $P(X = 1)$  增大,因此  $P(Y_i = 1 | X = 1)$  减小。

## 2 事件采样的先验概率计算方法

### 2.1 相关概念

元件发生故障是指元件由正常工作状态变为故障状态。要讨论元件故障先验概率,应该在一个时间区间内来讨论,在连续时间坐标的某个时间点上讨论是没有意义的。时间区间的选择是一个有待解决的问题。保护误动也是如此。为了避开这个问题,本文提出用事件采样的方式计算元件故障和保护误动的先验概率。

保护范围内元件故障之外的原因引起的保护动作为保护误动,这些原因称为保护误动事件。保

护动作由元件故障事件或保护误动事件引起。假设元件故障事件及保护误动事件都是相互独立的。当电网中出现保护动作时,即元件故障事件或保护误动事件发生时,对系统进行采样,获得的样本为系统所有保护的状态。在这样一种事件采样方式下,得到的样本空间 $\Omega$ 不包含所有保护都未动作的情况。诊断模型中的概率参数都是在样本空间 $\Omega$ 下计算得到的,因此该方法是可行的。

设系统有 $m$ 个元件, $n$ 个保护,给定 $Y = \{y_1, \dots, y_m, y_{m+1}, \dots, y_{m+n}\}$ ,其中 $y_i (1 \leq i \leq m)$ 表示元件故障事件, $y_i (m+1 \leq i \leq m+n)$ 表示保护误动事件。本文在样本空间 $\Omega$ 中讨论这些事件的先验概率。

## 2.2 泊松过程的叠加

泊松过程是一个计数过程 $\{N(t), t \geq 0\}$ ,其中 $N(t)$ 为非负整数,它表示在时间区间 $(0, t]$ 内出现的质点个数,质点到达间隔时间服从指数分布 $G(t) = 1 - e^{-\lambda t}$ ,其中 $\lambda$ 为泊松过程强度,表示单位时间内到达的质点数,它与质点平均到达间隔时间互为倒数。

根据泊松过程的可叠加性,用一个强度为 $\lambda_i$ 的泊松过程 $\{N_i(t)\}$ 来描述 $y_i$ 事件,则 $Y$ 可以用 $\{N(t)\}$ 描述为

$$\{N(t)\} = \sum_{i=1}^{m+n} \{N_i(t)\}$$

泊松过程 $\{N(t)\}$ 由 $m+n$ 个子泊松过程叠加而成,它的强度为

$$\Lambda = \sum_{i=1}^{m+n} \lambda_i$$

事件 $y_i$ 的概率为

$$P(y_i|\Omega) = \lambda_i / \Lambda \quad (3)$$

## 2.3 元件故障概率、保护误动概率和保护拒动概率

元件故障先验概率和保护误动概率可以利用式(3)计算得到。元件故障事件的泊松强度为元件故障频率,即单位时间内的元件故障次数。保护误动事件的泊松强度为保护误动频率。

保护拒动概率是一个条件状态概率,是指在该保护的范围内有元件故障时,保护处于某种异常状态而不动作的概率。它可以用公式 $q = \delta_j / (\delta_r + \delta_j)$ 计算获得,其中 $\delta_j$ 为单位时间内保护拒动次数, $\delta_r$ 为单位时间内保护正确动作次数。

文献[11]对2004年全国220 kV系统的统计数据如下:4721条线路总长168511 km 全年故障1933次;3969条母线全年51次故障;3721台变压器全年86次故障;线路保护正确动作22927次,

误动148次,拒动10次;母线保护正确动作111次,误动19次,拒动2次;变压器保护正确动作200次,误动52次,拒动1次。

线路故障先验概率(每百 km)计算结果为 $1933 / 1685.11 / (1933 + 86 + 51 + 148 + 19 + 52) \approx 5 \times 10^{-4}$ 。

采用2000—2004年的统计数据计算母线保护和变压器保护的拒动概率,先验概率的计算结果如表1所示。

表1 先验概率的计算结果

Tab. 1 Computation results of prior probability

故障类型	线路先验概率	母线先验概率	变压器先验概率
元件故障	$5 \times 10^{-4}$	$6 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-5}$
保护误动	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-6}$	$3.0 \times 10^{-6}$
保护拒动	$4 \times 10^{-4}$	$3 \times 10^{-2}$	$4.5 \times 10^{-3}$

## 3 分布式诊断模型及方法

### 3.1 诊断步骤

分布式诊断方法提取保护测量元件动作信号作为诊断证据。根据保护与被保护元件之间的因果关系,分别建立元件诊断贝叶斯网模型和联合诊断贝叶斯网模型。通过推理计算获得元件的故障概率,将该值与阈值比较来判断是否故障。其过程可分3个步骤完成:

1) 元件诊断模型范围内有保护动作时,启动该元件诊断模块。电网故障在空间和时间上具有稀疏性,这为分布式诊断带来便利。对Leaky Noisy-Or节点模型的推理1进行推广:元件诊断模型内无保护动作时,该元件可判定为无故障,并且独立于其他元件。

2) 对元件诊断模型进行推理计算,排除无故障元件,获得可疑元件集,进一步缩小诊断范围。根据Leaky Noisy-Or节点模型的推理1和2,得出如下结论:如果元件诊断模型的诊断结果是无故障,在全局诊断中该元件的诊断结果也将是无故障。直观上讲,在元件诊断模型中,如果元件被判定为无故障,则其中的保护动作只能解释为误动,而在全局情况下,这些保护动作具有更多可能的解释路径,除了解释为误动外,还可以解释为其它元件的故障,这取决于哪种解释的概率更大。

3) 对所有可疑元件建立联合诊断模型。对联合诊断模型进行推理计算,获得最终诊断结果。

### 3.2 诊断模型结构和参数

电网由线路、母线和变压器3类元件组成。给定 $U$ 和 $R$ ,其中 $U = \{u_1, u_2, \dots, u_m\}$ 是电网中所有元件

的集合,  $R = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$  是所有保护的集合。在 Leaky Noisy-Or 模型中, 元件是根节点, 保护是 Leaky Noisy-Or 类型的叶节点, 如果一个元件的故障有可能会引起某个保护动作, 那么它们之间存在因果关系, 可以用一个元件指向保护的箭头表示。

母线和变压器节点为二值节点, 其中 0 表示正常, 1 表示故障。在线路保护中, 有些保护无法覆盖线路全长, 如 I 段距离保护的覆盖范围一般为本线路的 80%~85%, II 段距离保护的覆盖范围为本线路全长且不超过下一线路的 I 段距离保护范围。本文将线路离散化, 用一个四值节点表示线路, 其中 0 表示线路正常, 1 表示线路 0~20% 内故障, 2 表示线路 20%~80% 内故障, 3 表示线路 80%~100% 内故障。

保护节点为二值 Leaky Noisy-Or 节点, 其中 0 表示正常, 1 表示动作。对于任意保护  $\forall r_i \in R$ , 根据该保护的整定值, 可以确定一个与之对应的元件子集  $U_i \subset U$ , 其中  $U_i$  是所有被  $r_i$  保护的元件集, 也是  $r_i$  节点的父节点集。假设对于  $r_1$  有  $U_1 = \{u_1, u_2, u_3\}$ , 其中  $u_1$  为母线、 $u_2$  为线路、 $u_3$  为变压器,  $r_1$  对于线路  $u_2$  的保护为 0~80%。 $r_1$  与  $U_1$  的关系可以用下式表示:

$$r_1 = (u_1 \vee u_2^1 \vee u_2^2 \vee u_3 \vee o_1) \wedge \neg o_1'$$

式中:  $u_j^k = \begin{cases} 0, & k \neq u_j \\ 1, & k = u_j \end{cases}$ , 线路  $u_2$  在 0~20% 内故障时,

$u_2^1$  为 1, 否则为 0; 线路  $u_2$  在 20%~80% 内故障时,  $u_2^2$  为 1, 否则为 0;  $o_1$  表示引起保护  $r_1$  误动的事件;  $o_1'$  表示引起保护  $r_1$  拒动的事件。

$r_1$  保护范围内所有元件未故障时  $r_1$  的动作概率为

$$P(r_1 = 1 | u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 = 0) =$$

$$P(r_1 = 1 | Y_{Leak} = 1) \approx P(o_1 = 1)$$

$r_1$  保护范围内单个元件独立引起  $r_1$  动作的概率为

$$P(r_1 = 1 | u_1 = 1, u_2 = 0, u_3 = 0, Y_{Leak} = 0) = 1 - P(o_1' = 1)$$

$$P(r_1 = 1 | u_1 = 0, u_2 = 1, u_3 = 0, Y_{Leak} = 0) = 1 - P(o_1' = 1)$$

$$P(r_1 = 1 | u_1 = 0, u_2 = 2, u_3 = 0, Y_{Leak} = 0) = 1 - P(o_1' = 1)$$

$$P(r_1 = 1 | u_1 = 0, u_2 = 0, u_3 = 1, Y_{Leak} = 0) = 1 - P(o_1' = 1)$$

式中:  $P(o_1' = 1)$  为保护  $r_1$  的拒动概率;  $P(o_1 = 1)$  为保护  $r_1$  的误动概率。

用  $p_1$  表示  $r_1$  的误动概率,  $q_1$  表示  $r_1$  的拒动概率, 保护节点  $r_1$  的条件概率表 (conditional probability table, CPT) 如表 2 所示。

表 2 保护节点  $r_1$  的条件概率表  
Tab. 2 CPT of relay node  $r_1$

$r_1$ 动作与否	$u_1 = 1$	$u_2 = 1$	$u_2 = 2$	$u_3 = 1$	$Y_{Leak}$
$r_1 = 0$	$q_1$	$q_1$	$q_1$	$q_1$	$1 - p_1$
$r_1 = 1$	$1 - q_1$	$1 - q_1$	$1 - q_1$	$1 - q_1$	$p_1$

### 3.3 元件诊断模型

对于任意元件  $\forall u_i \in U$ , 可以找到一个与之对应的保护子集  $R_i \subset R$ ,  $R_i$  是所有能够保护元件  $u_i$  的保护集。为了将元件诊断模型从电网模型中独立出来, 假定  $R_i$  中任一保护的动作为仅由元件  $u_i$  故障或其本身误动引起。假设对于元件  $u_1$  有  $R_1 = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$ , 元件  $u_1$  的诊断模型结构如图 2 所示。

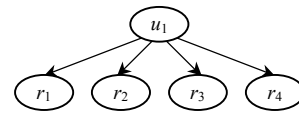


图 2 元件诊断模型

Fig. 2 An element diagnosis model

元件与保护的关系可以用下式表示:

$$r_1 = (u_1 \vee o_1) \wedge \neg o_1'$$

$$r_2 = (u_1 \vee o_2) \wedge \neg o_2'$$

$$r_3 = (u_1 \vee o_3) \wedge \neg o_3'$$

$$r_4 = (u_1 \vee o_4) \wedge \neg o_4'$$

获得一组保护动作信号后, 对元件诊断模型进行推理计算, 可获得元件在局部信息下的条件故障概率  $P(u_i = 1 | R_i)$ 。式(4)定义了元件故障判别函数,  $g(u_i)$  等于 0 表示该元件无故障, 否则该元件为可疑元件:

$$g(u_j) = \begin{cases} 0, & P(u_i = 1 | R_i) < 0.6 \\ 1, & P(u_i = 1 | R_i) \geq 0.6 \end{cases} \quad (4)$$

### 3.4 联合诊断模型

对电网各元件诊断模型进行推理计算后, 可获得可疑元件集  $U' = \{u_i | \forall u_i \in U, g(u_i) = 1\}$  及相关保护集  $R' = \{r_i | \forall r_i \in R, \exists u_j \in U', r_i \in R_j\}$ 。由于  $U'$  外的元件被确认为无故障,  $R'$  内的保护动作由其本身误动或  $U'$  内元件故障引起。根据  $U'$  内元件与  $R'$  内保护的因果关系, 建立基于 Leaky Noisy-Or 贝叶斯网的联合诊断模型。假设可疑元件集  $U'$  为  $\{u_1, u_2\}$ ,  $u_1$  的保护集  $R_1 = \{r_1, r_2, r_3, r_4\}$ ,  $u_2$  的保护集  $R_2 = \{r_3, r_4, r_5\}$ , 其联合诊断模型结构如图 3 所示。

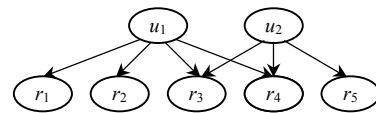


图 3 联合诊断模型

Fig. 3 A combined diagnosis model

元件与保护的关系可以用下式表示：

$$r_1 = (u_1 \vee o_1) \wedge \neg o'_1$$

$$r_2 = (u_1 \vee o_2) \wedge \neg o'_2$$

$$r_3 = (u_1 \vee u_2 \vee o_3) \wedge \neg o'_3$$

$$r_4 = (u_1 \vee u_2 \vee o_4) \wedge \neg o'_4$$

$$r_5 = (u_2 \vee o_5) \wedge \neg o'_5$$

通过对联合诊断模型的推理计算，可以获得在已知保护动作情况下各元件故障的条件概率。 $\forall u_i \in U$ ， $g'(u_i)$ 为1，则认为该元件故障，否则认为该元件正常，即

$$g'(u_i) = \begin{cases} 0, & P(u_i = 1 | R') < 0.6 \\ 1, & P(u_i = 1 | R') \geq 0.6 \end{cases}$$

#### 4 算例结果与分析

图4所示为济南地区220kV电网结构示意图<sup>[3]</sup>。图中：数字表示智能电力设备(intelligent electronic device, IED)和所对应断路器的编号，L表示线路。该系统保护配备情况如下：线路配三段式距离保护和2套独立的纵联差动保护，母线配1套差动保护。将设置在线路两端的一套纵联差动保护归为一个保护节点，同时动作时取值为1，同时未动作时取值为0，一侧无法获取则以另一侧为准，否则为“未知”状态。

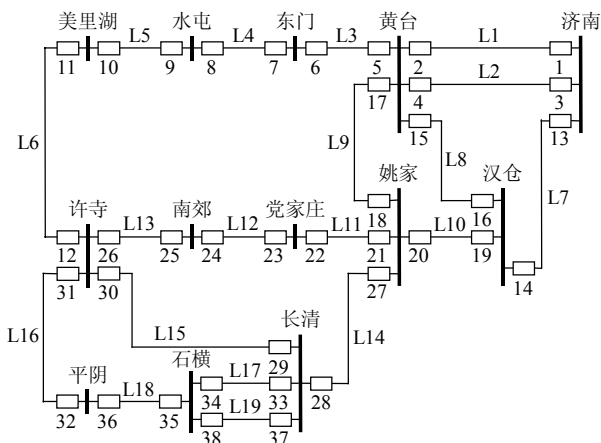


图4 济南某地区220kV电网结构示意图

Fig. 4 A sketch map of 220 kV power grid structure in Jinan

算例中的命名规则如下：“B\_站名缩写”表示母线，例如B\_XS代表许寺站母线；“L编号”表示线路；“R编号1\_编号2”表示距离保护，其中“编号1”为IED所在位置，“编号2”表示第几段距离保护，例如R26\_3代表26处第3段距离保护；“R\_站名缩写”表示母线差动保护，例如R\_XS代表许寺站母线差动保护；“RL编号1\_编号2”表示线路

纵联差动保护，其中“编号1”为线路编号，“编号2”代表第几套差动保护，例如RL13\_2表示线路L13的第2套纵联差动保护。

**算例1：**电网无故障，保护R25\_1、R25\_2、R25\_3误动。元件诊断结果为无可疑元件，即无元件故障。

**算例2：**许寺站母线B\_XS故障，母差保护R\_XS拒动，L13线路南郊侧距离保护2段R25\_2和3段R25\_3拒动。保护动作信息如下：R9\_3、R10\_3、R11\_2、R11\_3、R12\_3、R23\_3、R24\_3、R26\_3、R29\_2、R29\_3、R30\_3、R31\_3、R32\_2、R32\_3。元件诊断模型诊断结果如下：B\_XS、L6、L13、L15、L16为可疑元件。联合诊断模型诊断结果如下：B\_XS故障。

**算例3：**线路L15近许寺侧故障，许寺站保护信息无法获取。保护动作信息如下：RL15\_1、RL15\_2、R11\_2、R11\_3、R25\_3、R27\_3、R29\_2、R29\_3、R32\_2、R32\_3、R34\_3、R38\_3，保护R12、R26、R30和R31的3段都未知。元件诊断模型诊断结果如下：B\_XS、L6、L13、L15、L16为可疑元件。联合诊断模型诊断结果如下：L15故障。

**算例4：**水电站母线B\_ST故障，线路L12近南郊侧故障，L6线路纵联差动一套保护RL6\_1误动。保护动作信息如下：RL6\_1、RL12\_1、RL12\_2、R\_ST、R5\_3、R6\_3、R7\_2、R7\_3、R8\_3、R9\_3、R10\_2、R10\_3、R11\_3、R12\_3、R21\_3、R22\_3、R23\_2、R23\_3、R24\_1、R24\_2、R24\_3、R25\_3、R26\_3。元件诊断模型诊断结果如下：B\_ST、L4、L5、L6、L12、L13、B\_NJ为可疑元件。联合诊断模型诊断结果如下：B\_ST、L12故障。

#### 5 结论

1) 本文提出了一种事件采样的先验概率计算方式，根据统计数据计算获得元件故障概率、保护误动概率和保护拒动概率，准确地表达了元件故障和保护误动、拒动之间的统计关系。

2) 本文采用实时性强、冗余度高的保护测量元件动作信息作为诊断证据，提出了一种基于Leaky Noisy-Or贝叶斯网动态建模的分布式电网故障诊断方法。该方法降低了诊断建模和推理计算的复杂度，具有较好的实时性和很强的容错能力。

#### 参考文献

- [1] Tan J C, Crossley P A, Kirschen D, et al. An expert system for the

- back-up protection of a transmission network[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(2): 508-514.
- [2] 王晓茹, Hopkinson K M, Thorp J S, 等. 利用 Agent 实现新的电网后备保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 57-62.  
Wang Xiaoru, Hopkinson K M, Thorp J S, et al. Novel backup protection system for the electric power grid using Agent[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 57-62(in Chinese).
- [3] 丛伟, 潘贞存, 赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 8-14.  
Cong Wei, Pan Zhencun, Zhao Jianguo. A wide area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 8-14(in Chinese).
- [4] 毕天姝, 倪以信, 吴复立, 等. 基于新型神经网络的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 73-78.  
Bi Tianshu, Ni Yixin, Wu Fuli, et al. A novel neural network approach for fault section estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 73-78(in Chinese).
- [5] 刘青松, 夏道止. 基于正反向推理的电力系统故障诊断专家系统[J]. 电网技术, 1999, 23(9): 66-68.  
Liu Qingsong, Xia Daozhi. Expert system of power system fault diagnosis based on forward and backward reasoning[J]. Power System Technology, 1999, 23(9): 66-68(in Chinese).
- [6] Wen F S, Chang C S, Tian L. A modified abductive inference model for fault section estimation in power systems using the tabu search approach[J]. Electric Machines and Power Systems, 2000(28): 399-414.
- [7] 汤磊, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于信息理论的电力系统在线故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(7): 5-11.  
Tang Lei, Sun Hongbin, Zhang Boming, et al. Online fault diagnosis for power system based on information theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(7): 5-11(in Chinese).
- [8] 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. Fuzzy Petri nets and its application in the fault diagnosis of electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 74-79(in Chinese).
- [9] 吴欣, 郭创新, 曹一家. 基于贝叶斯网络计及信息时序属性的电力系统故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 14-18.  
Wu Xin, Guo Chuangxin, Cao Yijia. A new fault diagnosis approach of power system based on Bayesian network and temporal order information[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 14-18(in Chinese).
- [10] Henrion M. Some practical issues in constructing belief networks[C]. Uncertainty in Artificial Intelligence, Amsterdam, 1989.
- [11] 周玉兰, 王玉玲, 赵曼勇. 2004 年全国继电保护和自动装置运行情况[J]. 电网技术, 2005, 29(16): 42-48.  
Zhou Yulan, Wang Yuling, Zhao Manyong. Statistics of operation situation of protective relays and automation devices of power systems in China in 2004[J]. Power System Technology, 2005, 29(16): 42-48(in Chinese).



周曙

收稿日期: 2010-07-08。

作者简介:

周曙(1975), 男, 博士研究生, 研究方向为人工智能、电力系统故障诊断, E-mail: dino123@263.net;

王晓茹(1962), 女, 教授, 博士生导师, 从事电力系统广域保护和控制、配电网与变电站自动化技术方面的研究工作;

钱清泉(1936), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 从事工业监控、铁道电气化和自动化、电力系统自动化方面的研究工作。

(责任编辑 杜宁)