

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190451

## 基于贝叶斯网络的电网复杂故障推演新方法

李一泉<sup>1</sup>, 焦邵麟<sup>1</sup>, 曾耿晖<sup>1</sup>, 刘玮<sup>1</sup>, 屠卿瑞<sup>1</sup>, 谭乾<sup>1</sup>, 丛明一<sup>2</sup>, 詹庆才<sup>2</sup>

(1. 广东电力调度控制中心, 广东 广州 510032; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 为了分析电网复杂故障过程, 基于保护装置与断路器的动作信息构建贝叶斯网络, 提出了电网复杂故障推演新方法。应用电网实际拓扑结构信息、继电保护装置和断路器的动作信息构建贝叶斯网络。基于贝叶斯网络进行故障元件诊断, 针对远后备保护、近后备保护误判的两种特殊情况, 制定了专家系统规则实现保护拒动、误动的识别。将保信系统上传信息与拒动误动分析结果按主保护层-近后备保护-远后备保护-断路器层顺序进行信息整合, 推演出发生故障时各层保护装置以及断路器动作先后顺序, 实现了电网复杂故障推演。

**关键词:** 贝叶斯网络; 故障诊断; 故障推演; 拒动; 误动

### A new method to deduce complex fault of power grid based on Bayesian network

LI Yiquan<sup>1</sup>, JIAO Shaolin<sup>1</sup>, ZENG Genghui<sup>1</sup>, LIU Wei<sup>1</sup>, TU Qingrui<sup>1</sup>, TAN Qian<sup>1</sup>, CONG Mingyi<sup>2</sup>, ZHAN Qingcai<sup>2</sup>

(1. Guangdong Electric Power Dispatch and Control Center, Guangzhou 510032, China;

2. Beijing Sifang Protection Relay and Automation Company, Beijing 100085, China)

**Abstract:** In order to analyze the complex fault process of power grid, a Bayesian network is constructed based on the action information of protective devices and circuit breakers, and a new method of complex fault deduction of power grid is proposed. The Bayesian network is constructed by using the actual topological structure information of the power grid, the action information of relay protection devices and circuit breakers, and the fault components are diagnosed based on the Bayesian network. In view of the two special cases of remote backup protection and near backup protection misjudgment, the rules of expert system are formulated to realize the recognition of protection rejection and misoperation. The analysis results of information and malfunction rejection of the system are integrated according to the sequence of main protection layer-near backup protection-far backup protection-circuit breaker layer, and the sequence of action of each layer of protection device and circuit breaker is deduced to realize the deduction of power grid fault.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0101900) and Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Company (No. GDKJXM20162205) "Technical Research and Advanced Functions Application of Power Network Fault Fast Diagnosis Based on Fault Record Information".

**Key words:** Bayesian network; fault diagnosis; fault inference; rejection; misoperation

## 0 引言

随着电网规模的扩大, 电网运行方式更加复杂。当电力系统中发生复杂故障时, 大量二次设备动作告警信息涌入调度中心, 给调度运维人员分析事故原因以及故障过程增加了难度<sup>[1]</sup>。因此研究基于复杂故障二次保护设备的动作及告警信息, 推演出故障

发生后二次保护设备动作的先后顺序, 识别拒动、误动, 并重现故障过程, 以便电网调度人员和运维人员有效分析事故原因, 调整电网运行方式, 保障电网安全经济运行, 并为电网设备的运行管理提供优化和决策<sup>[2-5]</sup>。

现有的故障诊断方法有: 粗糙集理论<sup>[6-7]</sup>、神经网络<sup>[8-9]</sup>、模糊技术<sup>[10]</sup>、贝叶斯方法<sup>[11-13]</sup>、Petri网<sup>[14]</sup>、多智能体技术<sup>[15-17]</sup>等技术方法, 但是这些方法都各自存在着采集数据困难, 不能进行大规模建模, 无法有效地进行故障诊断和故障推演。文献[18]采用基于因果链分析法和可视化动画技术实现了故障回

**基金项目:** 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0101900); 广东电网公司科技项目资助(GDKJXM20162205)“基于故障录波信息的电网故障快速诊断技术研究及高级功能应用”

放系统,但对于复杂故障推演并未做详细介绍。文献[19]采用了TBKB理论进行电网故障诊断,研究TCR表达形式、时序约束一致性检查方法,实现了电网故障诊断对误动、拒动、时标出错异常判断。

本文基于文献[19]中贝叶斯网络的思想,通过节点的先验概率赋值可以反映出节点间层次化的逻辑关系,即元件-主保护-断路器-后备保护-断路器的动作顺序逻辑关系,提出基于贝叶斯网络的电力系统故障推演方法,根据保护信息管理系统中的保护配置,通过关联矩阵形成各个元件的贝叶斯网络,再利用保护装置与断路器动作信息,结合贝叶斯网络正向、反向推理来进行故障诊断与保护装置动作为分析。通过贝叶斯正向推理求取保护装置与断路器的期望动作概率,由此将贝叶斯网络中保护装置与断路器节点分类处理,将故障诊断结果中的拒动、误动分析以及上送的故障告警信息按上述分类,按主保护层-近后备保护-远后备保护-断路器顺序进行信息整合,推演出发生故障时,各层保护装置以及断路器动作先后顺序,实现电网故障推演。

### 1 贝叶斯网络推理

贝叶斯网络通过  $B = \{B_s, B_p\}$  表示<sup>[20-21]</sup>,其中  $B_s$  表示  $n$  个节点的有向无环的网络,每个节点代表一个变量  $X_i$ ,  $B_p$  表示贝叶斯条件概率分布表集合,每个节点条件概率分布为  $P(X_i/\text{parent}(X_i))$ ,式中,  $\text{parent}(X_i)$  表示  $X_i$  的父节点集合。

通过贝叶斯网络中节点的先验概率计算得到  $P(X_1, X_2, X_3, \dots, X_n)$ :

$$P(X_1, X_2, \dots, X_n) = \prod_{i=1}^n P(X_i / \text{parent}(X_i)) \quad (1)$$

贝叶斯概率推理是通过先验概率与贝叶斯公

式所构造的数学模型结合起来推断实际问题的概率分布。包括正向推理、反向推理。

在已知这些故障信息的前提下,计算条件概率  $P(X_i = x_i / E = e)$ ,即已知故障条件  $E = e$  下,计算  $X_i = x_i$  的概率

$$P(X_i = x_i / E = e) = \frac{P(X_i = x_i, E = e)}{P(E = e)} \quad (2)$$

在保护装置与断路器动作为分析过程中,经过正向推理后,在已知故障元件下,计算条件概率  $P(E = e / X_i = x_i)$ ,即已知故障元件的条件下,计算  $E = e$  的概率

$$P(E = e / X_i = x_i) = \frac{P(X_i = x_i, E = e)}{P(X_i = x_i)} \quad (3)$$

## 2 基于贝叶斯网络的电网复杂故障推演

### 2.1 贝叶斯网络模型矩阵形式的构建

针对如图1所示的高压输电网进行电网故障诊断研究,分析其局部电力系统继电保护信息与电网拓扑结构。目前我国高压输电网主要采用的主保护为纵联差动保护,后备保护采用两端零序过流保护和两端距离保护。

贝叶斯网络是一个有向无环图(DAG),由代表变量节点及连接这些节点有向边构成。其节点代表随机变量,节点间的有向边代表节点间的相互关系(由父节点指向子节点)。将图1电网模型分为三类集合:元件集合  $X$ 、保护装置集合  $Y$ 、断路器集合  $Z$ ;贝叶斯网络节点间连接关系分为:元件-保护装置、保护装置-断路器、断路器-保护装置;因此元件的贝叶斯网络可以用关联矩阵的形式表示,以L1元件为例:元件-保护装置的关联矩阵为

$$GL(X, Y) = (1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1)$$

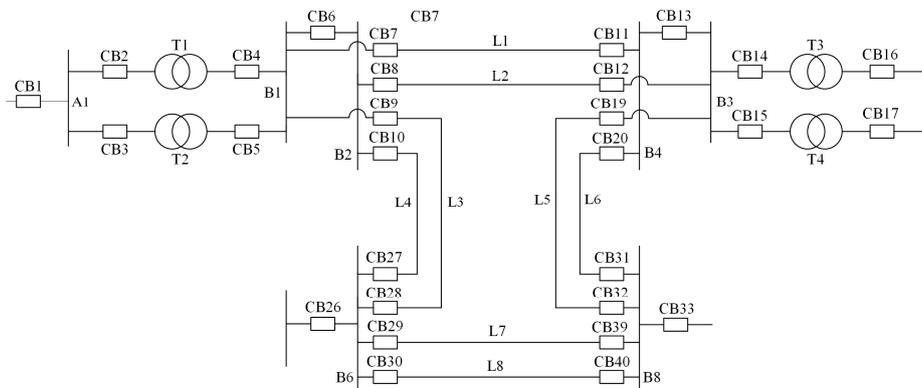


图1 高压输电网拓扑图

Fig. 1 HV transmission power system topology

表示以 L1 为父节点, 与 L1 相关联的保护装置为子节点构成的矩阵。保护装置-断路器、断路器-保护装置管理矩阵同理可得。关联矩阵行为父节点, 列为子节点, 其矩阵的形成, 可通过读取保信系统中元件保护配置情况以及保护动作原理。保护装置节点和断路器节点构成网络中叶节点, 其状态 0 和 1 分别表示它们处于“不动作”和“动作”状态。而这种状态一般可通过观测快速获得, 方便快捷地组成继电保护装置的各种信息。

对于图 1 中考虑的系统, 根据元件 T1 发生故障时形成的三组关联矩阵, 构造出变压器 T1 故障诊断的贝叶斯网络图, 如图 2 所示, 有向连接线 T1-T1RM-CB4-L1RS-CB11 表示: T1 发生故障时, T1RM 动作跳开 CB4, 如果 CB4 没有跳开, 则 L1RS 动作跳开 CB11, 并以此类推。

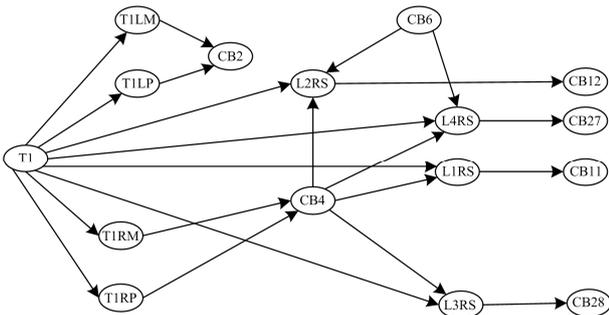


图 2 T1 故障诊断贝叶斯网络

Fig. 2 Bayesian network for fault diagnosis of T1

## 2.2 贝叶斯网络节点赋值

这里根据专家知识、试验数据以及设备的历史信息来对贝叶斯网络进行赋值, 以确定电力系统中各个元件节点的先验概率和继电保护节点的条件概率, 贝叶斯网络同样可以进行自主学习来进行数据的挖掘和更新, 这些概率信息表现了故障过程中的不确定性。本文贝叶斯节点概率赋值引用文献[22]中部分概率赋值情况。其余节点概率计算均引用文献[23-24]中的部分数据。

其中元件节点概率赋值如表 1 所示。

表 1 元件节点的故障先验概率表

Table 1 Failure prior probability table for element nodes

元件	线路/百 km	母线/条	变压器/台
故障先验概率	0.020 8	0.013 7	0.010 6

继电保护装置、断路器节点的条件概率赋值如表 2 所示。

根据电力系统各元件保护节点的条件概率具有相似性, 可以方便地挑选出几种继电保护类型的条

件概率, 通过相似类比计算出系统网络中剩余节点的条件概率值。

表 2 继电保护装置与断路器发生拒动、误动概率表

Table 2 Rejection and misoperation probability table

of relay protection device and circuit breaker

故障概率	线路保护	母线保护	变压器保护	断路器
误动	0.002 4	0.000 7	0.001 3	0.004 8
拒动	0.000 7	0.030 8	0.006 2	0.008 3

## 2.3 基于贝叶斯网络算法的电网复杂故障推演

### 2.3.1 判断贝叶斯网络中的故障元件

由于可以将电力系统网络中的每一个元件建立属于自身的贝叶斯网络模型, 故每一个元件均只能出现在自身的贝叶斯网络中。令经过反向推理的各元件故障概率为  $a_n$ , 设元件正常故障的阈值为 0.8, 即若  $a_n \geq 0.8$ , 则判定该元件为故障元件。

### 2.3.2 继电保护装置与断路器动作行为分析

利用贝叶斯算法的正向推理并结合贝叶斯先验概率赋值, 来求取电力系统网络中每个元件在贝叶斯网络中的各个节点的后验概率, 即在元件故障的情况下, 求取各个保护装置节点与断路器节点的期望动作概率。具体做法如下:

(1) 赋予元件 L1 证据“1”即视为元件 L1 故障。

(2) 利用贝叶斯公式结合节点先验概率赋值求取期望动作概率。

将期望动作概率与保护装置、断路器动作实际情况  $E$  作差, 以此作为保护装置与断路器动作判断。即通过下式

$$\begin{cases} -0.4 \leq P(E=1/X_i=1) \leq 0.6 \rightarrow \text{正确动作} \\ P(E=1/X_i=1) \leq -0.4 \rightarrow \text{误动} \\ 0.6 \leq P(E=1/X_i=1) \rightarrow \text{拒动} \end{cases} \quad (4)$$

基于贝叶斯正向推理结果得到远后备保护与近后备保护动作行为与实际动作行为有差异, 在反映主保护、近后备保护以及远后备保护动作的逻辑先后顺序存在一定的误判。并且当发生下述两种情况, 会导致结果误判:

(1) 近后备保护、断路器拒动, 远后备保护、断路器正确动作被判为误动作。

(2) 主保护正确动作, 近后备保护误动被判为正确动作。近后备保护不动作而被判为拒动。

针对上述两种情况, 经过分析得知: 针对第一种情况, 当出现主保护与近后备对应断路器拒动的情况下, 由于贝叶斯正向推理不能体现出保护动作的逻辑性, 故才会出现近后备保护拒动, 远后备保护被判为误动等情况, 导致远后备保护动作行为为分

析出现误判。针对第二种情况：当主保护正确动作时，才会出现主保护正确动作，近后备保护动作行为出现误判的情况。因此在经过贝叶斯正向推理对保护装置以及断路器动作行为进行初步判断后，需要经过一次反馈过程，判断是否发生上述两种特殊情况，如有上述两种动作情况，需要制定专家系统规则，对其结果进行修正，专家系统规则如下：

(1) 对于远后备保护动作行为出现误判，通过寻找贝叶斯正向推理，初步得到保护动作装置动作行为分析中的拒动断路器，通过搜索断路器-保护装置关联矩阵，寻找与拒动断路器存在关联联系的远后备保护与断路器，对其节点期望概率进行修正。

(2) 对于近后备保护动作行为出现误判时，在贝叶斯网络里寻找元件同端主保护元件，在主保护动作前提下，修改同侧近后备保护动作期望动作概率。将上述两种情况的动作期望概率+1 处理。

### 2.3.3 故障推演

在拒动误动识别时，通过正向推理，即在元件节点故障的情况下，正向推理出各个元件贝叶斯网络子节点的期望动作概率值，可将节点进行分层分类处理，将保护装置与断路器分为如下几层：主保护层、近后备保护层、主保护对应断路器层、远后备保护层、远后备对应断路器层。以 L1 元件为例，通过正向推理，将节点分类部分结果如表 3 所示。

表 3 L1 元件部分节点期望概率

Table 3 Expected probability of partial nodes of element L1

节点类型	节点名称	期望动作概率
主保护	L1RM	0.998 3
	L1LM	0.991 9
近后备保护	L1RP	0.900 4
	L1LP	0.903 3
远后备保护	L6RS	0.500 0
	T1LS	0.500 0
	CB11	0.980 0
	CB7	0.900 3
	CB2	0.498 2
断路器	CB3	0.498 2

故障发生时，依据保护配置原理，保护动作顺序应为：主保护层-近后备保护层-远后备保护层，故将保信系统上送的动作信息按上述层次进行分类，得到主保护层、近后备保护层、主保护对应断路器层、远后备保护层、远后备保护对应断路器层的动作信息。归类采用的方法是故障信息与上述集合取交集。将保护装置与断路器动作行为分析结果按上述层次分类，即将误动拒动信息层次化处理。

将由保信系统上送的保护装置信息形成的初

步推演结果与拒动误动信息分层处理结果进行整合，分别得到主保护层动作信息、误动信息和拒动信息等各层动作、拒动和误动信息。

按照主保护-近后备保护-远后备保护-断路器，将各层故障推演结果整合，生成最终包括动作信息以及拒动、误动信息的故障推演结果。

### 3 算例验证

本文采用 Matlab 编写基于贝叶斯网络电网复杂故障推演的程序，通过电力系统网络元件的贝叶斯网络拓扑结构，进行科学严谨的推理计算。

以图 1 的电网模型为例。通过查看保信系统接收到的故障信息表进行故障元件的判别验证，如表 4 所示。

表 4 一种实际情况的故障信息表仿真验证

Table 4 Simulation of fault information table in a real condition

序号	故障遥信内容	序号	故障遥信内容
1	B1m 动作	7	CB27 跳闸
2	CB4 跳闸	8	CB28 跳闸
3	CB5 跳闸	9	L1RP 动作
4	CB7 跳闸	10	CB11 跳闸
5	CB9 跳闸	11	
6	L4RS 动作	12	

#### 1) 故障区域识别

由保信系统信息，通过对比故障前后电网拓扑图，可得到故障区域(故障区域元件有 L1、B1、T1)。

#### 2) 故障区域建模

对故障区域内各个元件，读取保信系统信息，形成元件-保护装置即 X-Y、保护装置-断路器即 Y-Z、断路器-保护装置关联矩阵即 Z-Y，以此进行建立故障区域内的各个元件自己的贝叶斯网络诊断模型。

#### 3) 对于贝叶斯网络中的各个节点进行先验概率值赋值

根据 2.3 节贝叶斯网络算法赋值的原理，对贝叶斯网络中的各个节点进行先验概率的计算，并将计算得到的先验概率值赋值给相应的节点。

4) 应用贝叶斯故障诊断程序，对各个元件贝叶斯网络进行正向推理，得到 L1 元件故障概率为 0.996，同样可以对其他元件的贝叶斯网络进行正向推理得系统中其他元件的故障概率。

#### 5) 判别出电力系统中的故障元件

通过计算电力系统的故障区域内各元件的故障概率表，如表 5 所示。

表 5 故障元件概率表

Table 5 Probability of fault components

元件	L1	B1	T1
故障概率	0.996	0.827	0.126 6

由表 5 可知, L1、B1 故障概率大于 0.8, 所以推断出 L1、B1 为故障元件。

#### 6) 保护装置与断路器拒动、误动初步分析

在第 5) 步判断得到系统的故障元件后, 并在贝叶斯网络中进行正向推理, 得到各个继电保护装置与断路器的期望动作概率。初步判别保护装置与断路器的动作情况,

结果如表 6、表 7 所示。根据期望动作概率对贝叶斯节点进行分层处理。分层结果如表 8 所示。

表 6 元件 L1 保护装置与断路器拒动、误动分析

Table 6 Analysis of rejection and misoperation of protection device L1 and circuit breaker

元件	拒动	误动
	L1LM、L1RM	L4RS、CB27

表 7 元件 B1 保护装置与断路器拒动、误动分析

Table 7 Analysis of rejection and misoperation of protection device B1 and circuit breaker

元件	拒动	误动
	CB6、L2RS、CB12	CB11

表 8 保护装置与断路器分层结果

Table 8 Stratification result of protection device and circuit breaker

节点类型		期望概率值
主保护	B1M	0.986 1
	L4RS	0.500 0
	L1RS	0.500 0
远后备保护	L3RS	0.500 0
	T1LS	0.500 0
	T2LS	0.500 0
	L2RS	0.500 0
	CB7	0.967 2
主保护对应断路器	CB9	0.967 2
	CB4	0.978 0
	CB5	0.967 2
	CB6	0.967 2
	CB12	0.300 0
后备保护对应断路器	CB27	0.300 0
	CB11	0.498 2
	CB28	0.498 2
	CB8	0.498 2
	CB10	0.498 2
	CB2	0.498 2
	CB3	0.498 2

#### 7) 故障推演

将上送告警信息以及拒动误动分析结果按主保护-近后备保护-断路器-远后备保护-断路器层次进行分类, 并按上述顺序进行整合, 形成分层故障推演结果如表 9、表 10 所示。

将层次化故障推演结果整合, 可分别得到元件故障推演的最终结果。

#### B1 故障推演结果:

B1 母线故障-B1M-CB4-CB5-CB7-CB9-(CB6 拒动)-L4RS-CB27-(L2RS、CB12 拒动)。

#### L1 故障推演结果:

L1 故障-(L1RM、L1LM 即主保护拒动)L1RP-CB11-CB7。

表 9 母线 B1 贝叶斯网络层次化故障推演结果

Table 9 Inference results of B1 hierarchical Bayesian network

主保护层	近后备保护层	主保护对应断路器	远后备保护层	断路器
B1M		CB4-CB5-CB7-CB9	L4RS 动作	CB27 动作
动作		动作, CB6 拒动	L2RS 拒动	CB12 拒动

表 10 线路 L1 贝叶斯网络层次化故障推演结果

Table 10 Inference results of L1 hierarchical Bayesian network

故障元件	误动保护及断路器	拒动保护及断路器
L1	CB16	L1LM、CB7、L2LS、L4LS、CB12、CB17

## 4 总结

本文提出的基于贝叶斯网络电网复杂故障推演新方法, 可以实现对发生多级故障的电力系统进行故障诊断以及故障推演。与其他目前存在的方法进行比较, 本论文研究的方法具有如下特点: 通过关联矩阵方式建立贝叶斯故障诊断模型, 当网络结构发生变化时, 便于贝叶斯网络的自动修改。通过对贝叶斯网络节点先验概率赋值可以充分反映网络中各个节点的先后动作顺序, 结合正向推理, 将贝叶斯网络节点进行分层处理, 上送动作告警信息以及拒动误动分析结果, 按上述分层即主保护-后备保护-断路器的顺序进行分层整合, 形成层次化的故障事件发生顺序, 最后通过 Matlab 编写故障诊断以及故障推演程序。对于复杂故障, 能够诊断出故障元件以及准确推演出保护装置以及断路器动作的先后顺序, 从而为操作运行人员分析故障原因提供了参考的依据。

#### 参考文献

[1] 胡斌, 郭亚飞, 杨彬, 等. 智能变电站技术的现状与发

- 展趋势研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(3): 87-90.
- HU Bin, GUO Yafei, YANG Bin, et al. Research on status and development trend of smart substation technology[J]. Smart Power, 2018, 46(3): 87-90.
- [2] CHEN W H. Online fault diagnosis for power transmission networks using fuzzy digraph models[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(2): 688-698.
- [3] 樊丽琴, 田俊杰, 陈佩琳. 继电保护故障信息系统应用功能探讨[J]. 山西电力, 2006(6): 58-61.
- FAN Liqin, TIAN Junjie, CHEN Peilin. Discussion on the application function of relay protection fault information system[J]. Shanxi Electric Power, 2006(6): 58-61.
- [4] FUKUI C, KAWAKAMI J. An expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(4): 83-90.
- [5] 王继生, 郭锐, 刘方方, 等. 基于信息相似度的配电网故障培训评价方法[J]. 智慧电力, 2018, 46(6): 95-100.
- WANG Jisheng, GUO Rui, LIU Fangfang, et al. Distribution network fault training evaluation method based on information similarity[J]. Smart Power, 2018, 46(6): 95-100.
- [6] 王林先, 李乃永. 基于粗糙集理论和故障信息网的电网故障诊断方法[J]. 继电器, 2008, 36(8): 59-67.
- WANG Linxian, LI Naiyong. A power network fault diagnosis method based on rough set theory and fault information networks[J]. Relay, 2008, 36(8): 59-67.
- [7] 吕小红, 张敏, 曹文忠, 等. 基于灰色经验融合的电网故障研判模型[J]. 中国电力, 2018, 51(4): 27-32.
- LÜ Xiaohong, ZHANG Min, CAO Wenzhong, et al. Research on power grid fault judgment model based on gray experience fusion[J]. Electric Power, 2018, 51(4): 27-32.
- [8] FLORES A, QUILES E, GARCIA E, et al. Fault diagnosis of electric transmission lines using modular neural networks[J]. IEEE Latin America Transactions, 2016, 14(8): 3663-3668.
- [9] 卢彬, 刘茜, 高林, 等. 基于 NARX 神经网络的锅炉壁温预测模型[J]. 热力发电, 2019, 48(3): 35-41.
- LU Bin, LIU Xi, GAO Lin, et al. Prediction model of boiler platen superheater tube wall temperature based on NARX neural network[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(3): 35-41.
- [10] 金明亮, 李会新, 谢俊, 等. 基于规则式的多重故障诊断及最优送电路径策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(4): 176-182.
- JIN Mingliang, LI Huixin, XIE Jun, et al. Rule based intelligent fault diagnosis and recovery power delivery algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(4): 176-182.
- [11] FEEIRAVH, ZANGHIR, FORTESMZ, et al. A survey on intelligent system application to fault diagnosis in electric power system transmission lines[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 136: 135-153.
- [12] 罗孝辉, 童晓阳. 计及可信度的变结构贝叶斯网络电网故障诊断[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2658-2664.
- LUO Xiaohui, TONG Xiaoyang. Structure-variable Bayesian network for power system fault diagnosis considering credibility[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2658-2664.
- [13] 王守鹏, 赵冬梅. 电网故障诊断的研究综述与前景展望[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(19): 164-175.
- WANG Shoupeng, ZHAO Dongmei. Research review and prospects for power grid fault diagnosis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(19): 164-175.
- [14] 曾庆锋, 何正友, 杨健维. 基于有色 Petri 网的电力系统故障诊断模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 5-11.
- ZENG Qingfeng, HE Zhengyou, YANG Jianwei. Fault diagnosis model of electric power system based on colored Petri net[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 5-11.
- [15] 田方媛, 张岩, 徐兵, 等. 多代理系统框架下的主动配电系统故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(6): 19-26.
- TIAN Fangyuan, ZHANG Yan, XU Bing, et al. Fault diagnosis based on multi agent system for active distribution system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6): 19-26.
- [16] 张岩, 张勇, 文福拴, 等. 融合信息理论的电力系统故障诊断解析模型[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(2): 158-164, 174.
- ZHANG Yan, ZHANG Yong, WEN Fushuan, et al. Analytical model for power system fault diagnosis integrated with information theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(2): 158-164, 174.
- [17] 闫湖, 黄碧斌, 刘龙珠. 人工智能在新一代电力系统中的应用前景分析[J]. 电力信息与通信技术, 2018, 16(11): 7-11.
- YAN Hu, HUANG Bibin, LIU Longzhu. Artificial intelligence application prospect in the new generation of electric power system[J]. Electric Power Information and

- Communication Technology, 2018, 16(11): 7-11.
- [18] 王毅, 陈建民, 韩学军, 等. 基于继电保护故障信息处理平台的故障回放系统的开发与应用[J]. 华东电力, 2014, 42(3): 442-445.  
WANG Yi, CHEN Jianmin, HAN Xuejun, et al. Development and application of fault playback system based on relay protection fault information processing platform[J]. East China Electric Power, 2014, 42(3): 442-445.
- [19] 孙明蔚, 童晓阳, 刘新宇, 等. 运用时序贝叶斯知识库的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 715-722.  
SUN Mingwei, TONG Xiaoyang, LIU Xinyu, et al. Grid fault diagnosis method based on time-series Bayesian knowledgebase[J]. Power System Technology, 2014, 38(3): 715-722.
- [20] 李强, 徐建政. 基于主观贝叶斯方法的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(15): 46-50.  
LI Qiang, XU Jianzheng. Power system fault diagnosis based on subjective Bayesian approach[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(15): 46-50.
- [21] 何小飞, 童晓阳, 周曙. 基于贝叶斯网络和故障区域识别的电网故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(13): 29-34.  
HE Xiaofei, TONG Xiaoyang, ZHOU Shu. Power system fault diagnosis based on Bayesian network and fault section location[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(13): 29-34.
- [22] 何小飞, 童晓阳, 孙明蔚. 基于贝叶斯网络和D-S证据理论的分布式电网故障诊断机[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 42-47.  
HE Xiaofei, TONG Xiaoyang, SUN Mingwei. Distributed power grid fault diagnosis machine based on Bayesian network and D-S evidence theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 42-47.
- [23] 杨国生, 桂强, 张烈, 等. 双通道线路纵联保护应用情况分析及其评价指标[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 77-83.  
YANG Guosheng, GUI Qiang, ZHANG Lie, et al. Application analysis and evaluation index research of dual channel line protection[J]. Electric Power, 2018, 51(6): 77-83.
- [24] 吴玉鹏, 陈丽鹃, 王鹏, 等. 2002年全国电力可靠性统计分析[J]. 中国电力, 2003, 36(5): 4-10.  
WU Yupeng, CHEN Lijuan, WANG Peng, et al. Statistical analysis of national power reliability in 2002[J]. Electric Power, 2003, 36(5): 4-10.

---

收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-05-28

作者简介:

李一泉(1979—), 男, 博士, 高工, 研究方向为电力系统继电保护与控制; E-mail: 750286398@qq.com

焦邵麟(1977—), 男, 硕士, 高工, 研究方向为电力系统故障分析与继电保护。E-mail: 2391448346@qq.com

(编辑 张爱琴)