

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230784

基于贝叶斯网络信息融合的直流配电网故障诊断方法

王鹤, 韦搏, 李石强, 于华楠, 边竞, 仇华华

(现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室(东北电力大学), 吉林 吉林 132012)

摘要: 新型直流配电系统故障期间暂态特征复杂多变, 继电保护存在拒动和误动情况。为了避免继电保护的不正确动作对故障诊断产生影响, 提出一种基于贝叶斯网络信息融合的直流配电网故障诊断方法。首先, 对传统继电保护贝叶斯网络模型进行改进, 同时考虑直流配电网故障限流策略, 分别构建保护动作信息、断路器动作信息和限流策略信息3种贝叶斯网络模型, 对故障区域内各元件的故障概率进行初步评估。其次, 利用D-S证据理论将各元件对应的故障概率信息进行融合, 完成故障元件的判别。然后, 应用故障元件对应的贝叶斯网络模型识别误动或拒动的保护装置与断路器, 实现对直流配电网的故障诊断。最后, 通过算例验证了所提故障诊断方法的可靠性以及准确性。

关键词: 直流配电网; 贝叶斯网络; 故障限流策略; D-S证据融合; 故障诊断

Fault diagnosis of a DC distribution network based on Bayesian network information fusion

WANG He, WEI Bo, LI Shiqiang, YU Huanan, BIAN Jing, QIU Huahua

(Key Laboratory of Modern Electric Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology
(Northeast Electric Power University), Ministry of Education, Jilin 132012, China)

Abstract: There are situations of complex and variable transient characteristics and rejection and misoperation of relay protection during faults in new DC distribution systems. To avoid the impact of incorrect relay protection actions on fault diagnosis, this paper presents a fault diagnosis method for a DC distribution network based on Bayesian network information fusion. First, the traditional relay protection Bayesian network model is improved, while considering the DC distribution network fault current limiting strategy, and three Bayesian network models of protection, circuit breaker and current-limiting strategy information are constructed respectively to make preliminary evaluation of the fault probability of each component in the fault area. Secondly, D-S evidence theory is used to fuse the corresponding failure probability information of each component to realize the identification of the faulty components. Then, the Bayesian network model corresponding to the faulty elements is applied to identify the protection devices and circuit breakers for misoperation or rejection to achieve fault diagnosis. Finally, the correctness and reliability of the proposed method are verified through an analysis of arithmetic cases.

This work is supported by the General Program of National Natural Science Foundation of China (No. 52177074).

Key words: DC distribution network; Bayesian network; fault current-limiting strategy; D-S evidence fusion; fault diagnosis

0 引言

随着“双碳”目标的提出, 越来越多的分布式电源和新型负荷广泛接入配电网, 直流配电网凭借其灵活接入、线路损耗小以及传输能力强等技术优势, 成为近年来研究的热点^[1-4]。当直流配电网发生故障时, 调度中心收到来自数据采集与监视控制系

统(supervisory control and data acquisition, SCADA)大量二次设备的报警信息, 这给运维检修人员分析直流配电网故障原因以及故障过程增加了难度。因此研究有效的电网故障诊断方法对恢复供电和保证电网安全稳定运行具有重要意义。

电网的故障诊断指的是通过保护以及断路器的具体动作数据对故障区域内的元件进行故障诊断, 同时对保护装置和断路器进行诊断^[5]。目前国内外比较典型的电网故障诊断方法有 Petri 网^[6-7]、人工

基金项目: 国家自然科学基金面上项目资助(52177074)

神经网络^[8-9]、专家系统^[10-11]、粗糙集理论^[12-13]、解析模型^[14-15]、多源信息融合^[16-17]和贝叶斯网络^[18-19]等。文献[19]对电网中保护和断路器的动作状态以及发生时刻进行可信度评估,在贝叶斯推理过程中引入可信度的概念,实现电网故障诊断。该方法所定义的保护装置以及断路器动作延时在几十甚至几百毫秒,考虑到直流配电网继电保护对速动性要求较高,因此这种可信度评估方式在直流配电网中无法使用。文献[20]通过构建贝叶斯网络模型,实现保护拒动、误动的识别,推演出电网发生故障时各保护装置以及断路器的动作顺序,实现了电网复杂故障推演。该方法中贝叶斯网络结构会导致断路器的信息对元件故障判断影响较小,在断路器由于某些原因未动作的情况下容易出现误判。文献[21]利用特定的分割方法对电网进行分割,引入重合度概念进行D-S证据融合,结合继电保护动作信息对不同区域内的子网分别进行诊断,再将各自诊断结果集中融合,实现对电网的故障诊断。

由于保护装置和断路器存在“拒动”和“误动”的情况,调度中心收到的继电保护信息并不完全准确,给故障诊断带来了很大困难。本文提出了基于贝叶斯网络信息融合的直流配电网故障诊断方法。对传统基于贝叶斯网络电网故障诊断模型进行改进,将直流配电网继电保护信息分为保护动作信息以及断路器动作信息,依照其各自动作逻辑分别构

建贝叶斯网络模型。同时考虑直流配电网发生故障时产生的故障电流对继电保护动作的影响,将直流配电网故障紧急限流策略信息引入到故障诊断中,利用D-S证据融合理论将上述信息进行整合,通过贝叶斯反向和正向推理的方法分别推断出故障元件以及保护装置和断路器动作行为分析结果,从而实现直流配电网的故障诊断,并通过仿真验证该方法的可靠性和正确性。

1 直流配电网继电保护贝叶斯网络模型

1.1 直流配电网拓扑结构及其保护配置

本文参考中国杭州江东新城、江苏同里等直流配电网示范工程,所建立的直流配电网结构如图1所示。该直流配电网通过模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)实现交、直流变换,换流器出口处配置故障限流器(fault current limiter, FCL),有效降低短路电流上升速率和幅值,有助于提高直流配电网的安全性与稳定性;每条线路以及母线端口处都配有直流断路器(DC circuit breaker, DCCB),用于隔离发生故障的线路或母线。

根据直流配电网的拓扑结构以及换流器所处的位置,将直流配电网的保护分为4个区域,分别是交流侧保护、换流器保护、负荷保护和直流侧保护^[22],并对各区域配置相应的保护策略。保护区域的划分如图1所示。

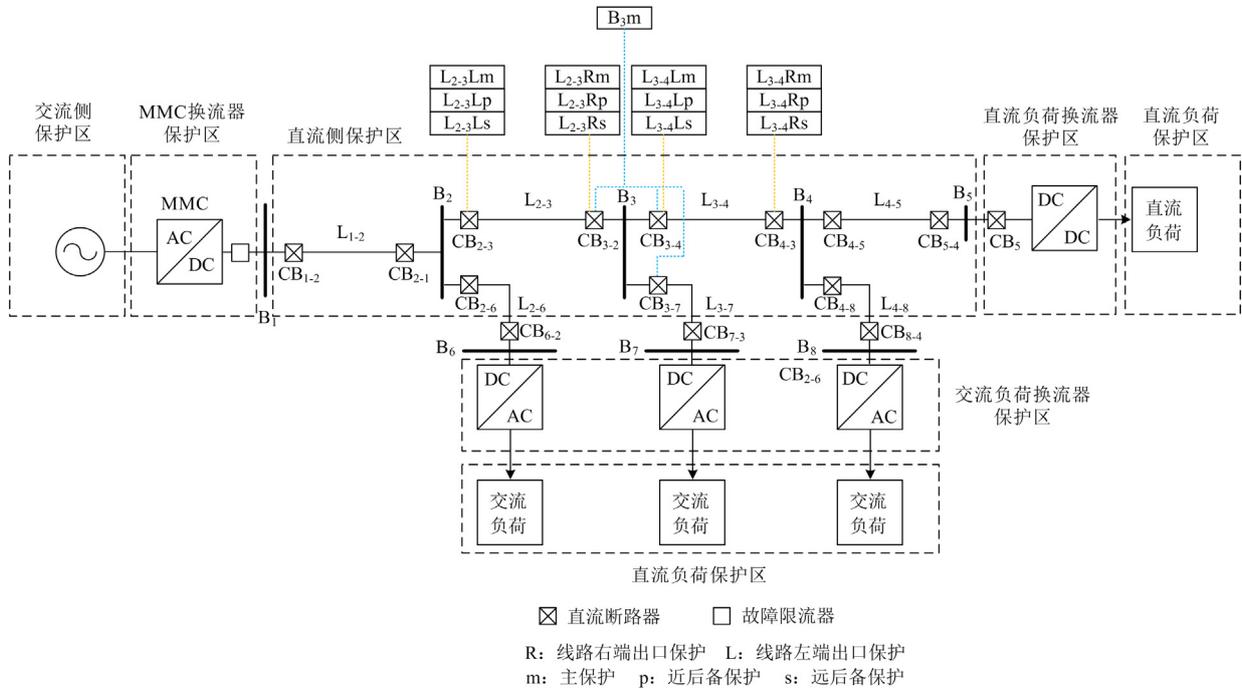


图1 直流配电网拓扑及其保护配置图

Fig. 1 Topology and protection configuration of DC distribution network

直流配电网的保护配置的目的是自动地、选择性地、快速地将故障元件从电力系统中切断, 使故障元件免于继续遭受损坏。保护配置时要考虑换流器功率传输方向、控制以及运行方式等诸多因素。每个保护区域的保护配置策略如表 1 所示。

表 1 直流配电网保护配置

Table 1 DC distribution network protection configuration	
保护区域	保护策略
交流侧保护区域	变压器过流保护、母线过压/低压保护等
换流器保护区域	桥臂过流保护、桥臂差动保护、 阀过流保护等
负荷保护区域	过电流保护、过电压保护以及 换流器接口保护等
直流侧保护区域	电压不平衡保护、低电压过电流保护 以及差动保护等

1.2 直流配电网保护动作原理

本文主要针对直流配电网中线路和母线进行分析, 以图 1 中线路 $L_{2,3}$ 左端保护 $L_{2,3}Lm$ 、 $L_{2,3}Lp$ 和 $L_{2,3}Ls$ 为例来介绍有关线路保护动作原理, 其中 $L_{2,3}Lm$ 为主保护, 它仅负责保护自身线路, 即线路 $L_{2,3}$; $L_{2,3}Lp$ 为近后备保护, 它同样保护线路本身, 当主保护 $L_{2,3}Lm$ 由于某些原因拒动时, 近后备保护 $L_{2,3}Lp$ 动作保护自身线路; $L_{2,3}Ls$ 为远后备保护, 通常情况下它会在相邻元件发生故障时动作, 当相邻母线 B_3 故障而其主保护未动作时, $L_{2,3}Ls$ 作为远后备保护动作隔离故障。这三种类型的保护动作后都会使断路器 $CB_{2,3}$ 跳闸。

对于母线保护, B_3m 为主保护, 它仅负责保护母线本身, 即母线 B_3 , 当母线 B_3 发生故障时, 母线主保护 B_3m 动作触发断路器 $CB_{3,2}$ 、 $CB_{3,4}$ 和 $CB_{3,7}$ 跳闸; 母线的后备保护由母线相邻元件的后备保护充当, 即线路 $L_{2,3}$ 与线路 $L_{3,4}$ 的远后备保护作为母线 B_3 的后备保护。

1.3 贝叶斯网络原理

贝叶斯网络是一种基于网络结构的有向无环图。网络中每个节点代表一个变量, 有向弧代表各变量之间的关系, 各节点与其子节点之间的条件概率表示变量之间的依赖关系。数学描述为: 若论域 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, 其中 x_1, x_2, \dots, x_n 为贝叶斯网络中各节点, 则多个节点发生的联合概率 $p(x_1, x_2, \dots, x_n)$ 为

$$p(x_1, x_2, \dots, x_n) = \prod_{i=1}^n p(x_i | \pi(x_i)) \quad (1)$$

式中, $\pi(x_i)$ 表示 x_i 的父节点集合。

对于贝叶斯网络中的某个节点 x_i , 该节点中有

m 个基本事件 $\{e_1, e_2, \dots, e_m\}$, 假设已经获取除节点 x_i 外所有与其相关节点的事件结果 $E = \{x_1, \dots, x_{i-1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_n\}$, 那么节点 x_i 的第 s 个事件 e_s 所发生的条件概率为

$$p(x_i = e_s | E) = \frac{p(x_i = e_s, E)}{p(E)} = \frac{p(x_i = e_s) \prod_{j=1, j \neq i}^n p(x_j | \pi(x_j))}{\sum_{k=1}^m \left[p(x_i = e_k) \prod_{j=1, j \neq i}^n p(x_j | \pi(x_j)) \right]} \quad (2)$$

1.4 直流配电网继电保护贝叶斯网络模型

在直流配电网的继电保护中, 元件发生故障时, 保护装置与断路器动作不仅有时序关系, 两者之间还存在一定的逻辑关系。通常情况下, 直流配电网保护会在元件发生故障后动作, 在保护动作后会驱动断路器动作, 从而实现故障隔离。考虑到直流配电网中存在保护装置和断路器拒动的情况, 通过继电保护实现故障隔离分为以下 3 种情况。

情况 1: 直流配电网元件发生故障, 主保护(近后备保护)动作跳开近端断路器。

情况 2: 直流配电网元件发生故障, 主保护(近后备保护)动作, 近端断路器拒动, 远后备保护动作跳开远端断路器。

情况 3: 直流配电网元件发生故障, 主保护(近后备保护)拒动, 远后备保护动作跳开远端断路器。

基于上述 3 种继电保护动作逻辑, 所建立继电保护贝叶斯网络模型如图 2 所示。各网络节点依据继电保护动作逻辑相互连接, 连接顺序为: “元件-主保护-近后备保护-近端断路器-远后备保护-远端断路器”。在贝叶斯网络模型中用“0”和“1”表示各个节点的状态: 针对元件节点, 其“正常”工

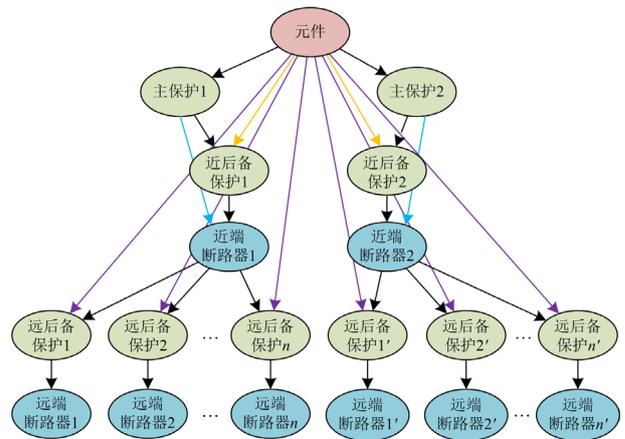


图 2 直流配电网继电保护贝叶斯网络模型

Fig. 2 Bayesian network model for relay protection of DC distribution network

作状态由“0”表示，“故障”状态由“1”表示；针对断路器以及保护节点，它们的“不动作”状态由“0”表示，“动作”状态由“1”表示。

传统贝叶斯网络模型结构中元件节点仅与保护节点相连，而断路器节点在贝叶斯网络模型中只起到连接各类保护节点的作用，这就使得断路器的动作信息对故障元件诊断的影响较小。

2 基于贝叶斯网络信息融合的直流配电网故障诊断

为了强化断路器信息对元件故障诊断的影响，对传统的贝叶斯网络模型的结构进行改进。按照信息种类的不同，将传统继电保护贝叶斯网络模型拆分为两个贝叶斯网络模型，同时考虑到直流配电网在发生故障时会采用故障限流策略来抑制故障电流，将故障限流策略当成报警信息引入到故障诊断中来，建立限流策略信息贝叶斯网络模型。通过证据融合理论将各贝叶斯网络反向推理的结果进行融合，计算出故障区域内各元件的故障概率，推断出故障元件；之后利用贝叶斯正向推理得到拒动与误动的保护装置及断路器。

2.1 改进的贝叶斯网络模型结构

传统 SCADA 系统中获取的信息可以分为两大类，一类为保护动作信息，另一类为断路器动作信息，因此可以针对这两类信息分别建立贝叶斯网络。

2.1.1 保护信息贝叶斯网络模型的构建

保护动作信息对应的贝叶斯网络模型如图 3 所示，其结构的连接顺序为“元件-主保护-近后备保护-远后备保护”。

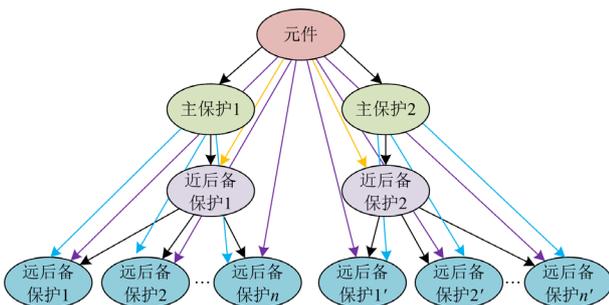


图 3 保护信息贝叶斯网络模型

Fig. 3 Bayesian network model for protection information

2.1.2 断路器信息贝叶斯网络模型的构建

断路器动作信息对应的贝叶斯网络模型如图 4 所示，其结构的连接顺序为“元件-近端断路器(由主保护或近后备保护动作后触发跳开)-远端断路器(由远后备保护动作后触发跳开)”。

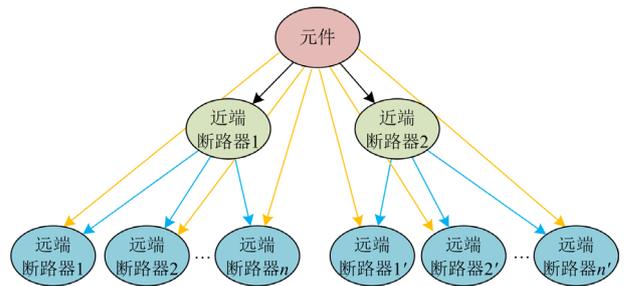


图 4 断路器信息贝叶斯网络模型

Fig. 4 Bayesian network model for circuit breaker information

当直流配电网出现主保护(近后备保护)以及近端断路器未动作，远后备保护动作跳开远端断路器隔离故障的情况时，远端断路器节点作为贝叶斯网络模型的叶节点，当其父节点(远后备保护节点)状态为“1”时，无论其状态为“1”还是“0”，故障元件诊断的结果都是一样的，即远端断路器的状态信息对元件故障诊断没有起到任何作用。因此本文将传统继电保护贝叶斯网络模型中各个节点按照信息类型进行分类，分为保护信息和断路器信息两个方面，并且依据各自动作逻辑建立全新的贝叶斯网络模型。这样能够更加直观地分析故障元件，弱化贝叶斯网络中断路器节点对保护节点的依赖；同时当出现部分保护信息缺失的情况时，仍然能够通过断路器信息对故障区域内疑似故障元件进行排查。

2.1.3 限流策略信息贝叶斯网络模型的引入

直流配电网不同于交流配电网，由于直流配电系统惯性小，当直流侧发生短路故障时，换流站立刻向短路点馈入故障电流，故障电流上升速度快、幅值大，容易使换流器等电力电子器件瞬间闭锁。通常情况下，在直流配电系统中保护识别故障时间和断路器动作时间远大于电力电子器件闭锁时间，因此需要通过某些方法限制故障电流的上升速率，延长从故障发生到换流器闭锁的时间，在换流阀闭锁前实现故障检测；同时通过抑制故障电流可以显著降低 DCCB 开断电流的大小，降低 DCCB 的成本需求。

目前针对特定的直流配电网限制故障电流的策略主要有两类。一类是对换流器采取紧急限流控制策略，其基本思路为：在发生直流故障后，根据直流故障点直流电压大小自适应地改变换流器 MMC 桥臂投入的子模块数量，来限制直流故障电流的上升^[23]。另一类是加入故障限流器来抑制故障电流，当直流配电网正常运行时，故障限流器在机械旁路开关的作用下未投入使用，在直流配电网发生故障时，故障限流器投入到直流配电网中，抑制故障电流^[24]。

将这两种限制故障电流策略当作报警信息引入

到直流配电网故障诊断中。针对故障限流策略信息所建立的贝叶斯网络模型中, 父节点为直流配电网元件(线路或者母线), 父节点分别连接两个子节点, 每个子节点对应一种故障限流策略。当直流配电网中某元件发生故障时, 直流配电网采取一种限流策略来抑制故障电流。限流策略和传统的继电保护协同下实现直流故障清除, 流程如图 5 所示。

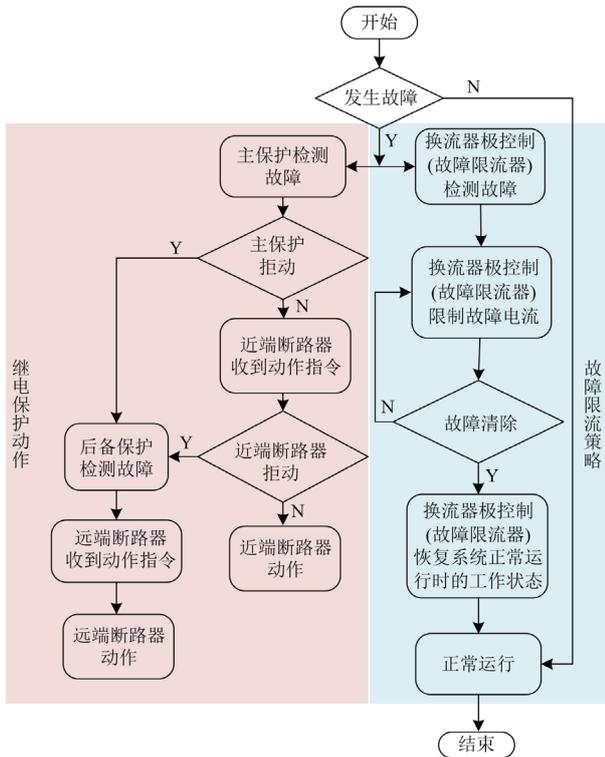


图 5 限流策略下的继电保护动作流程

Fig. 5 Flow of the relay protection action based on the current-limiting strategy

故障发生后经过一定时间的延时, 换流器极控制器或者故障限流器检测到故障。对应换流器切换为紧急限流控制模式, 调整各桥臂的子模块投入数; 而故障限流器则投入到电网中抑制故障电流。当换流器或者故障限流器检测到直流故障已经被直流断路器清除后, 对应换流器立即从紧急限流控制切换为常规控制模式; 而故障限流器通过旁路机械开关退出电网, 使直流电网恢复正常运行。

2.2 基于贝叶斯网络信息融合的直流配电网故障诊断

基于贝叶斯网络信息融合的直流配电网故障诊断主要包括两大部分: 首先是判断直流配电网故障元件; 其次是继电保护装置与断路器动作行为分析。下面依次对这两部分进行介绍。

2.2.1 贝叶斯网络节点条件概率赋值

直流配电网故障时, 在紧急故障限流策略的作用下, 限制了故障电流, 会对直流配电网继电保护动作产生一定影响, 使得保护和断路器拒动和误动的概率增大。本文参考文献[25]设定元件节点故障先验概率和继电保护装置与断路器动作故障概率, 分别如表 2 和表 3 所示。

2.2.2 判断直流配电网故障元件

三类信息贝叶斯网络模型通过贝叶斯反向推理得到各自网络模型下的元件故障概率, 需要应用 D-S 证据理论进行故障概率融合。

表 2 元件节点故障先验概率表

元件	交流线路	交流母线	直流线路	直流母线
概率	0.0208	0.0137	0.1187	0.1123

表 3 继电保护装置与断路器动作故障概率表

Table 3 Relay protection device and circuit breaker action failure probability

动作	交流侧			直流侧				
	线路保护	母线保护	断路器	线路保护	母线保护	断路器	故障限流器	换流器紧急限流控制
误动	0.0024	0.0007	0.0048	0.1022	0.1006	0.1043	0.07	0.07
拒动	0.0007	0.0308	0.0083	0.1006	0.1277	0.1075	0.07	0.07

D-S 证据理论是一种不精确推理的理论, 它可以将命题转化为数学集合的方式进行分析。假定存在一个需要判断的问题, 将问题所对应相互排斥的结果形成完备的集合, 称为辨识框架 $\theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ 。在辨识框架 θ 上定义基本概率赋值函数 p , 需要保证所有赋值函数总和等于 1, 即 $\sum_{A \subseteq \theta} p(A) = 1$, 其中 $p(A)$ 表示对命题 A 的支持程度。

在同一辨识框架 θ 下有 n 组证据体 E_1, E_2, \dots, E_n 对命题 A 做出评价, 每组证据体对应一种基本信任分配函数 p_1, p_2, \dots, p_n , 各组证据体中对命题 A 所作评价的状态用 A_i 来表示, 定义 Dempster 合成规则为

$$P(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{\cap A_i \neq \emptyset} \prod_{1 \leq i \leq n} p_i(A_i)}{1 - K} & A \neq \emptyset \\ 0 & A = \emptyset \end{cases} \quad (3)$$

$$K = \sum_{\cap A_i = \emptyset} \prod_{1 \leq i \leq n} p_i(A_i) \quad (4)$$

式(3)反映了各个证据体之间的关系；式(4)中 K 表示冲突系数，能够体现出证据之间的冲突大小情况，即 K 值越大表明证据之间的冲突越大，当 K 的取值为 1 时，基本概率赋值函数 p 之间相互矛盾，组合规则无法对赋值函数进行融合计算。 $\frac{1}{1-K}$ 为正则化因子，本质上是为了使 $P(A)$ 的总和值为 1。

保护信息贝叶斯网络模型 E_p 、断路器信息贝叶斯网络模型 E_{CB} 以及故障限流策略信息贝叶斯网络模型 E_L 为 D-S 证据理论中 3 组相互独立的证据体，其各自的基本概率赋值函数是由相应的贝叶斯网络模型结合 SCADA 系统采集到的继电保护信息通过贝叶斯反向推理得到的，将这 3 组证据体得到的元件故障概率信息结合 D-S 证据理论合成规则，融合的公式如式(5)所示。

$$P(X=1) = \frac{P_{CB}(X=1) \times P_p(X=1) \times P_L(X=1)}{\left\{ \begin{aligned} & [P_{CB}(X=1) \times P_p(X=1) \times P_L(X=1)] + \\ & [P_{CB}(X=0) \times P_p(X=0) \times P_L(X=0)] \end{aligned} \right\}} \quad (5)$$

式中： P_p 、 P_{CB} 以及 P_L 分别表示保护信息、断路器信息以及紧急故障限流策略信息贝叶斯网络模型下求得的概率值； X 代表各个贝叶斯网络对应的父节点，即元件节点(母线或线路节点)。

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。令经过反向推理后融合的各元件故障概率为 a_n ，设线路故障的阈值为 0.8^[20]，母线故障的阈值为 0.6^[19]，当 a_n 大于等于对应元件的故障阈值时，则判定该元件为故障元件。利用 D-S 证据理论判断故障元件的流程如图 6 所示。

2.2.3 保护装置和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，来求取直流配电网中故障元件在其对应的保护信息贝叶斯网络模型和断路器信息贝叶斯网络模型下的各个节点的后验概率，即在已知元件故障的情况下，求取各个保护装置节点与断路器节点的期望动作概率。具体步骤如下所述。

步骤 1：找出故障元件所对应的保护信息贝叶斯网络模型和断路器信息贝叶斯网络模型，将这两个贝叶斯网络模型中的父节点(元件节点)设置为状态“1”，即该元件发生故障；

步骤 2：对保护信息贝叶斯网络模型和断路器信息贝叶斯网络模型做贝叶斯算法的正向推理，以

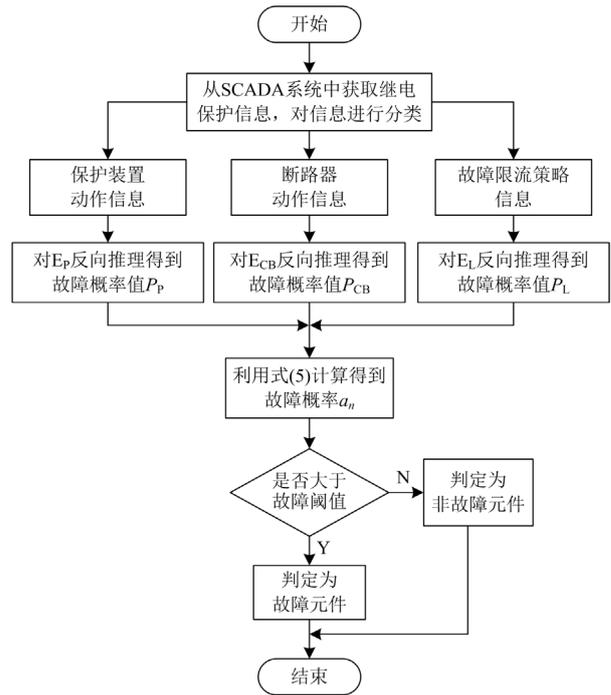


图 6 D-S 证据理论判断故障元件流程

Fig. 6 Flow of judging the fault component based on D-S evidence theory

计算出在发生故障的情况下对应保护和断路器的动作期望；

步骤 3：将通过贝叶斯算法正向推理求得的保护装置以及断路器的期望动作概率，与保护装置以及断路器动作实际情况 E 作差，得到差值 Δm ，其中实际情况从 SCADA 系统中获取，即获取到的保护装置和断路器信息动作状态为“1”，未动作状态为“0”，以此作为保护装置与断路器动作判断依据。

$$\begin{cases} -a \leq \Delta m \leq b & \text{正常} \\ \Delta m < -a & \text{误动} \\ \Delta m > b & \text{拒动} \end{cases} \quad (6)$$

式中， $a, b \in (0,1)$ ，且 $a+b=1$ ，本文 a, b 均取值为 0.5。

3 算例分析

基于 Matlab R2018a 仿真平台，根据图 1 所示直流配电网保护配置图，验证本文所提方法的正确性。将传统贝叶斯网络算法与本文所提的基于贝叶斯网络信息融合方法进行对比。

3.1 线路故障

有关直流配电网中的线路故障，本文设计正常、断路器拒动以及保护拒动 3 个故障场景。

场景 1: 线路 $L_{2,3}$ 故障, 换流器紧急限流控制启动, 断路器 $CB_{3,2}$ 和 $CB_{2,3}$ 跳闸; 具体继电保护信息如表 4 所示。

表 4 场景 1 继电保护动作信息

Table 4 Relay protection action information in scene 1

序号	动作时刻	断路器/保护	状态
1	21:30:26:350	线路 $L_{2,3}m$	动作
2	21:30:26:351	换流器紧急限流控制	启动
3	21:30:26:52	断路器 $CB_{2,3}$	跳闸
4	21:30:27:353	断路器 $CB_{3,2}$	跳闸

以场景 1 为例对本文的方法进行简要说明, 参照保护和断路器动作信息并结合直流配电网拓扑结构可知, 在故障区域内只有一个元件, 即线路 $L_{2,3}$; 针对线路 $L_{2,3}$ 建立 3 个贝叶斯网络模型, 分别如图 7—图 9 所示。通过建立的贝叶斯网络模型并结合保护和断路器动作信息, 将这 3 个贝叶斯网络得到的故障概率通过 D-S 证据融合方法进行融合, 最终得到的故障概率为 99.46%, 而用传统方法得到的故障概率为 91.25%。从故障概率结果能够看出, 本文方法在保护和断路器均不存在拒动以及误动的正常情况下, 计算结果要优于传统方法。

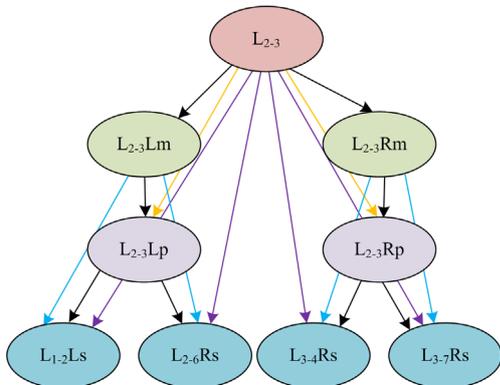


图 7 线路 $L_{2,3}$ 的保护信息贝叶斯网络模型

Fig. 7 Bayesian network model for protection information of line $L_{2,3}$

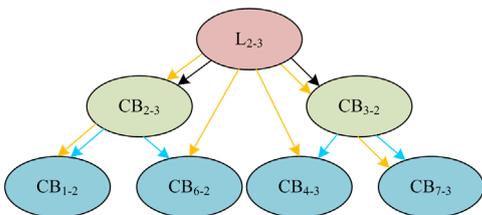


图 8 线路 $L_{2,3}$ 的断路器信息贝叶斯网络模型

Fig. 8 Bayesian network model for circuit breaker information of line $L_{2,3}$

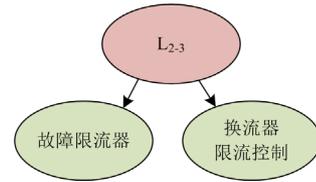


图 9 线路 $L_{2,3}$ 的限流策略信息贝叶斯网络模型

Fig. 9 Bayesian network model for current-limiting strategy information of line $L_{2,3}$

场景 2: 线路 $L_{2,6}$ 故障, 故障限流器投入, 断路器 $CB_{2,6}$ 拒动, 相关后备保护动作并触发断路器跳闸; 具体继电保护信息如表 5 所示。将继电保护动作信息与实际直流配电网拓扑相结合能够看出, 故障区域内有 4 个元件, 其中线路元件为 $L_{1,2}$ 、 $L_{2,3}$ 和 $L_{2,6}$, 母线元件为 B_2 , 对这些元件建立相应的贝叶斯网络模型并计算其概率, 传统方法^[20](M_1)、考虑限流策略信息时本文方法(M_2)以及不考虑限流策略信息时本文方法(M_3)的对比如图 10 所示。

表 5 场景 2 继电保护动作信息

Table 5 Relay protection action information in scene 2

序号	动作时刻	断路器/保护	状态
1	19:20:18:440	线路 $L_{2,6}m$	动作
2	19:20:18:441	故障限流器	投入
3	19:20:18:442	断路器 $CB_{6,2}$	跳闸
4	19:20:18:445	线路 $L_{1,2}Ls$	动作
5	19:20:18:446	断路器 $CB_{1,2}$	跳闸
6	19:20:18:447	线路 $L_{2,3}Rs$	动作
7	19:20:18:449	断路器 $CB_{3,2}$	跳闸

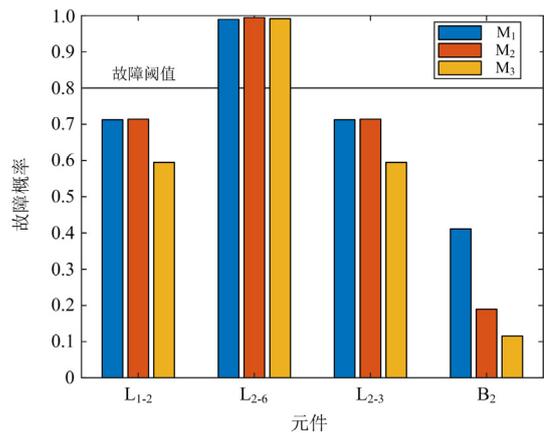


图 10 场景 2 三种方法计算结果对比

Fig. 10 Comparison of calculation results between the three methods in scene 2

在确定故障元件为线路 $L_{2,6}$ 后, 对故障元件所对应的保护信息以及断路器信息贝叶斯网络做正向

推理, 根据继电保护行为判据规则, 计算结果如图 11 所示。

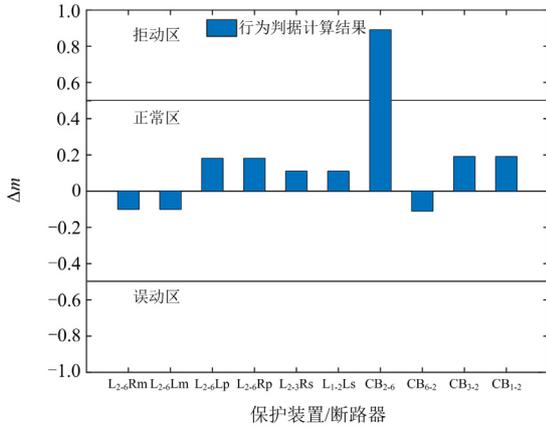


图 11 场景 2 下继电保护和断路器行为判据

Fig. 11 Criteria for relay protection and circuit breaker behavior in scene 2

从继电保护和断路器行为计算结果能看出, CB_{2-6} 处在误动区。场景 2 的诊断结果如表 6 所示, 故障诊断结果为线路 L_{2-6} 故障, 断路器 CB_{2-6} 拒动, 与预设场景一致。

表 6 场景 2 诊断结果分析

Table 6 Diagnostic results in scene 2

元件	M ₁	M ₂	M ₃	诊断结果
L ₁₋₂	0.7127	0.7142	0.5948	
L ₂₋₆	0.9897	0.9947	0.9916	L ₂₋₆ 故障
L ₂₋₃	0.7127	0.7142	0.5948	CB ₂₋₆ 拒动
B ₂	0.4115	0.1897	0.1157	

场景 3: 线路 L_{2-6} 故障, 换流器紧急限流控制启动, 主保护 $L_{2-6}Lm$ 拒动, 相关后备保护动作并触发断路器跳闸, 具体继电保护信息如表 7 所示; 元件故障和继电保护动作行为分析结果如表 8、图 12 以及图 13 所示。

表 7 场景 3 继电保护动作信息

Table 7 Relay protection action information in scene 3

序号	动作时刻	断路器/保护	状态
1	12:38:41:510	线路 $L_{2-6}Rm$	动作
2	12:38:41:511	换流器紧急限流控制	启动
3	12:38:41:512	断路器 CB_{6-2}	跳闸
4	12:38:41:514	线路 $L_{1-2}Ls$	动作
5	12:38:41:516	线路 $L_{2-3}Rs$	动作
6	12:38:41:517	断路器 CB_{1-2}	跳闸
7	12:38:41:518	断路器 CB_{3-2}	跳闸

表 8 场景 3 诊断结果
Table 8 Diagnostic results in scene 3

元件	M ₁	M ₂	M ₃	诊断结果
L ₁₋₂	0.7127	0.7142	0.5948	
L ₂₋₃	0.9209	0.9742	0.9551	L ₂₋₆ 故障
L ₂₋₆	0.7127	0.7142	0.5948	L _{2-6}Lm 拒动}
B ₂	0.4115	0.1897	0.1157	

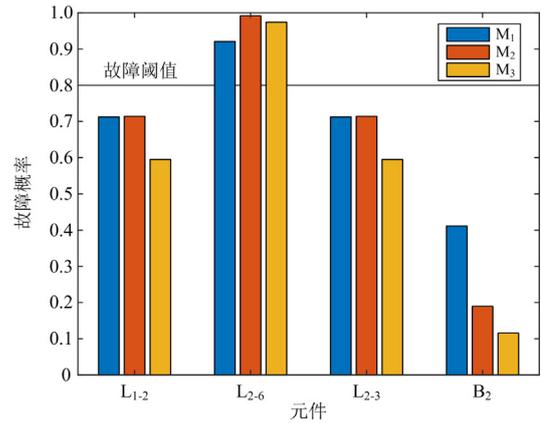


图 12 场景 3 三种方法计算结果对比

Fig. 12 Comparison of calculation results between the three methods in scene 3

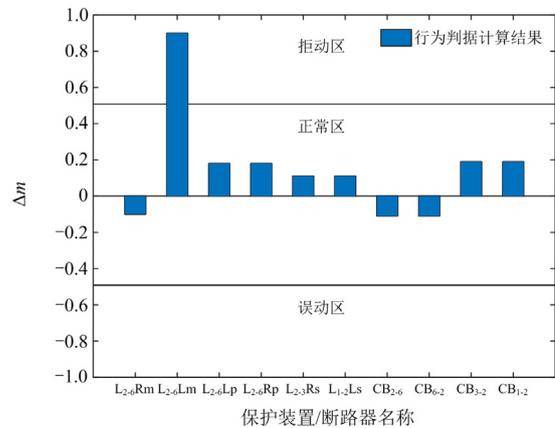


图 13 场景 3 下继电保护和断路器行为判据

Fig. 13 Criteria for relay protection and circuit breaker behavior in scene 3

当线路主保护动作而近端断路器拒动时(场景 2), 针对故障线路, 本文方法在不考虑故障限流信息时比传统方法精度提升了 0.18%, 而在考虑故障限流策略信息时比传统方法精度提升了 0.5%, 其原因是线路主保护对故障判断有很大影响, 即当主保护动作时就已经可以确定主保护对应的线路发生故障; 为了避免主保护对故障元件判别的影响, 在线路

主保护发生拒动时(场景 3), 针对故障线路, 本文方法在不考虑故障限流策略信息时比传统方法精度提升了 3.41%, 而在考虑故障限流策略信息时比传统方法精度提升了 5.33%。而针对未发生故障的母线, 从对比结果能够看出本文方法在考虑和不考虑故障限流信息的情况下得到的故障概率都小于传统方法下得到的故障概率, 更有利于故障元件的判据。

此外, 继电保护动作信息在传输至 SCADA 系统的过程中, 数据途经多次路由可能导致 SCADA 系统中信息缺失, 对元件故障诊断造成影响。为此, 以场景 1—场景 3 中某些继电保护信息缺失为例, 3 种方法的故障诊断结果对比如表 9 所示。

表 9 信息缺失情况下线路的故障诊断结果

Table 9 Fault diagnosis results for line with lack of information

场景	缺失信息	元件	M ₁	M ₂	M ₃
1	L ₂₋₃ Rm	L ₂₋₃	0.803	0.9543	0.9212
		L ₁₋₂	0.7127	0.7242	0.5948
2	L ₂₋₆ m	L ₂₋₆	0.7857	0.8119	0.7224
		L ₂₋₃	0.7127	0.7242	0.5948
		B ₂	0.3341	0.161	0.0968
3	L ₂₋₃ Rs	L ₁₋₂	0.591	0.739	0.6128
		L ₂₋₃	0.7127	0.7242	0.5948
		L ₂₋₆	0.8639	0.9585	0.9281
		B ₂	0.3341	0.161	0.0968

从表 9 的计算结果能够看出: 当部分继电保护信息在传输过程中缺失时, 传统贝叶斯网络方法在某些故障场景下已经不能检测出故障线路, 即使能检测出故障线路, 其故障概率 a_n 与故障阈值差距很小, 不利于故障线路的判别; 而本文方法能够有效检测出故障线路, 其抗干扰能力优于传统方法。

3.2 母线故障

针对直流配电网中母线故障, 本文设计正常、保护误动与断路器拒动、保护拒动 3 个故障场景, 所设计的故障场景如下所述。

场景 4: 母线 B₃ 故障, 换流器紧急限流控制启动, 断路器 CB₃₋₂、CB₃₋₄ 以及 CB₃₋₇ 跳闸, 具体继电保护信息如表 10 所示。

表 10 场景 4 继电保护动作信息

Table 10 Relay protection action information in scene 4

序号	动作时刻	断路器/保护	状态
1	21:30:26:350	母线 B ₃ m	动作
2	21:30:26:351	换流器紧急限流控制	启动
3	21:30:26:352	断路器 CB ₃₋₂	跳闸
4	21:30:27:353	断路器 CB ₃₋₄	跳闸
5	21:30:27:354	断路器 CB ₃₋₇	跳闸

场景 5: 母线 B₂ 故障, 故障限流器投入, 断路器 CB₂₋₃ 拒动, 保护 L₂₋₆Rs 误动, 相关后备保护动作并触发断路器跳闸, 具体继电保护信息如表 11 所示。

表 11 场景 5 继电保护动作信息

Table 11 Relay protection action information in scene 5

序号	动作时刻	断路器/保护	状态
1	14:17:16:390	母线 B ₂ m	动作
2	14:17:16:391	故障限流器	投入
3	14:17:16:392	断路器 CB ₂₋₁	跳闸
4	14:17:16:393	断路器 CB ₂₋₆	跳闸
5	14:17:16:395	线路 L ₂₋₆ Rs	动作
6	14:17:16:397	线路 L ₂₋₃ Rs	动作
7	14:17:16:398	断路器 CB ₃₋₂	跳闸

场景 6: 母线 B₂ 故障, 换流器紧急限流控制启动, 母线主保护 B₂m 拒动, 相关后备保护动作并触发断路器跳闸, 具体继电保护信息如表 12 所示。

表 12 场景 6 继电保护动作信息

Table 12 Relay protection action information in scene 6

序号	动作时刻	断路器/保护	状态
1	17:21:26:121	线路 L ₁₋₂ Rs	动作
2	17:21:26:122	换流器紧急限流控制	启动
3	17:21:26:123	断路器 CB ₂₋₁	跳闸
4	17:21:26:124	线路 L ₂₋₃ Rs	动作
5	17:21:26:125	线路 L ₂₋₆ Rs	动作
6	17:21:26:127	断路器 CB ₃₋₂	跳闸
7	17:21:26:128	断路器 CB ₆₋₂	跳闸

对这 3 种故障场景分别进行故障元件的诊断和继电保护行为分析, 场景 5 的诊断结果如图 14 和图 15 所示, 场景 6 的诊断结果如图 16 和图 17 所示, 3 种场景下总的诊断结果如表 13 所示。

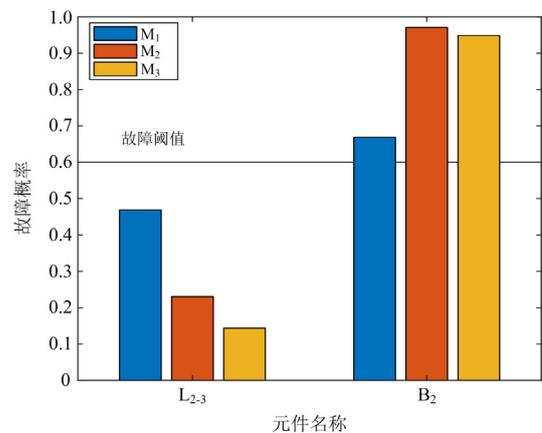


图 14 场景 5 三种方法计算结果对比

Fig. 14 Comparison of calculation results between the three methods in scene 5

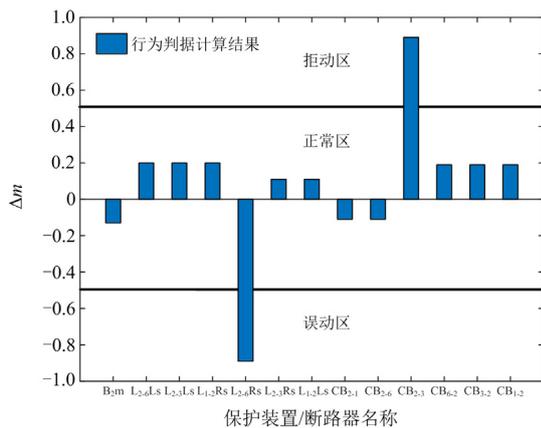


图 15 场景 5 继电保护和断路器行为判据
Fig. 15 Criteria for relay protection and circuit breaker behavior in scene 5

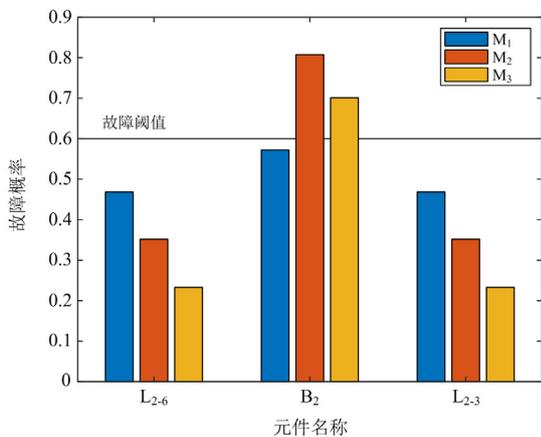


图 16 场景 6 三种方法计算结果对比
Fig. 16 Comparison of calculation results between the three methods in scene 6

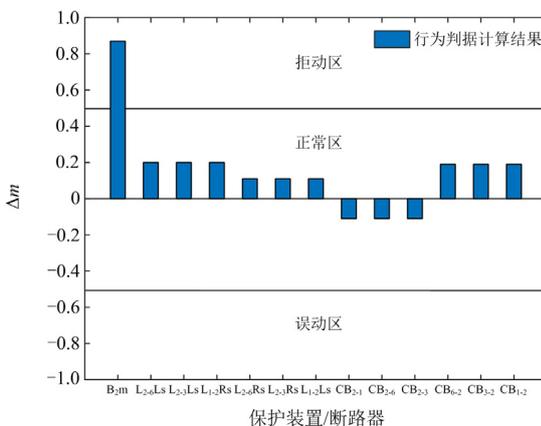


图 17 场景 6 继电保护和断路器行为判据
Fig. 17 Criteria for relay protection and circuit breaker behavior in scene 6

表 13 3 种场景下的诊断结果分析

Table 13 Analysis of diagnostic results in three scenes

场景	元件	M ₁	M ₂	M ₃	诊断结果
4	B ₃	0.6723	0.9936	0.9886	B ₃ 故障
5	L _{2,3}	0.4682	0.2306	0.1435	B ₂ 故障
	B ₂	0.6685	0.9705	0.9485	L _{2,6} Rs 误动 CB _{2,3} 拒动
6	L _{2,6}	0.4682	0.3519	0.2329	B ₂ 故障
	B ₂	0.5721	0.8075	0.7010	B _{2m} 拒动

当直流配电网中母线发生故障并且出线保护误动以及断路器拒动的情况下(场景 5),从计算结果可以看出,针对故障区域内发生故障的母线,本文方法在不考虑故障限流信息时比传统方法精度提升了 28%,而在考虑故障限流策略信息时比传统方法精度提升了 30.2%,本文方法计算得到的故障概率大于传统方法;针对故障区域内非故障的母线和线路,本文方法计算得到的故障概率小于传统方法,即本文方法能够提高故障母线的故障概率值,降低非故障母线和线路的故障概率值,更有利于故障识别。场景 6 设置了母线主保护拒动的严重故障情况,从图 16 的结果能够看出,此时传统方法已不能进行故障识别,本文方法在不考虑故障限流信息时比传统方法精度提升了 12.9%,而在考虑故障限流策略信息时比传统方法精度提升了 23.54%,考虑故障限流策略信息下提高故障概率的同时依然能够准确进行故障诊断。

针对母线故障,同样以场景 4—场景 6 中某些继电保护信息缺失为例,3 种方法的故障诊断结果对比如表 14 所示。

表 14 信息缺失情况下母线的故障诊断结果

Table 14 Fault diagnosis results for bus with lack of information

场景	缺失信息	元件	M ₁	M ₂	M ₃
4	CB _{3,2}	B ₃	0.6723	0.9479	0.9104
5	L _{2,3} Rs	L _{2,3}	0.4682	0.2306	0.1435
		B ₂	0.5996	0.9705	0.9485
6	L _{2,6} Rs	L _{2,6}	0.4682	0.3519	0.2329
		B ₂	0.4775	0.7116	0.5796

从表 14 的计算结果能够看出:当某些继电保护信息缺失时,传统方法已不能诊断出故障母线,而本文所提方法可以诊断出故障母线;对于故障场景 4 而言,SCADA 系统缺失的是断路器动作信息,即 CB_{3,2} 信息缺失,相比于没有信息缺失时场景 4 的母线故障诊断,两种场景下采用传统方法进行故障诊断所得到的母线故障概率值是相同的,即利用传统

方法进行故障诊断时断路器动作信息是否缺失对于故障诊断结果并未产生影响。从表 13 与表 14 的计算结果对比能够看出,本文所提出的方法在断路器动作信息未缺失时的故障诊断结果明显要大于断路器动作信息缺失时的故障诊断结果,说明本文方法中断路器动作信息对于故障诊断的结果是有影响的,有效地强化了断路器动作信息对元件故障诊断的影响,同时本文方法诊断母线故障的抗干扰能力也优于传统算法。

4 结论与展望

本文提出了基于贝叶斯网络信息融合的直流配电网故障诊断方法,实现了直流配电网发生故障后对元件以及继电保护行为的诊断,与现有同类型的故障诊断方法相比,本文的研究方法有以下优势:1)对传统的贝叶斯网络模型进行改进,将继电保护信息分为保护动作信息和断路器动作信息两大类,并依据其各自的动作逻辑分别建立贝叶斯网络模型,有效地避免了传统贝叶斯网络模型中断路器信息对元件故障判断影响较小的问题;2)考虑了直流配电网故障紧急限流策略,将其作为报警信息并引入到直流配电网故障元件诊断中,增加了报警信息的来源,提高了故障诊断的精度。

当直流配电网发生故障时,不仅要考虑继电保护信息的状态变化,还需要进一步考虑继电保护动作之间的时序关系,建立起继电保护动作逻辑与时序之间的联系,有待后续进一步研究。

参考文献

- [1] 李霞林,郭力,黄迪,等. 直流配电网运行控制关键技术综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049.
- [2] 刘子奕,贾科,姚昆鹏,等. 基于主动注入的柔性直流配电网故障定位[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(18): 21-30.
LIU Ziyi, JIA Ke, YAO Kunpeng, et al. An active converter injection-based fault location method for a flexible DC distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(18): 21-30.
- [3] 左鹏飞,秦文萍,夏福良,等. 基于零模电流相关性的直流配电网单极接地选线方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(13): 86-96.
ZUO Pengfei, QIN Wenping, XIA Fuliang, et al. Single-pole ground selection method for DC distribution networks based on zero-mode current correlation[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(13): 86-96.
- [4] 杨欢红,朱子叶,黄文焘,等. 基于直接时间反转法的直流配电网故障测距[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(16): 66-75.
YANG Huanhong, ZHU Ziye, HUANG Wentao, et al. Fault location of a DC distribution network based on a direct time reversal method[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(16): 66-75.
- [5] FERREIRA V H, ZANGHI R, FORTES M Z, 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.
- [6] 杨斐然,于永进. 基于时间约束的分层模糊 Petri 网的配电网故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 99-106.
YANG Feiran, YU Yongjin. Fault diagnosis of distribution network based on time constrained hierarchical fuzzy Petri nets[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 99-106.
- [7] 徐彪,尹项根,张哲,等. 计及拓扑结构的时间 Petri 网故障诊断模型[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(9): 2723-2735.
XU Biao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Time Petri net based fault diagnosis model considering topology structure[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2723-2735.
- [8] 石东源,熊国江,陈金富,等. 基于径向基函数神经网络和模糊积分融合的电网分区故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 562-569.
SHI Dongyuan, XIONG Guojiang, CHEN Jinfu, et al. Divisional fault diagnosis of power grids based on RBF neural network and fuzzy integral fusion[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 562-569.
- [9] 熊国江,石东源,朱林,等. 基于径向基函数神经网络的电网模糊元胞故障诊断[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(5): 59-65.
XIONG Guojiang, SHI Dongyuan, ZHU Lin, et al. Fuzzy cellular fault diagnosis of power grids based on radial basis function neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(5): 59-65.
- [10] 赵冬梅,张旭,魏娟,等. 以重现故障过程为目的的电网故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(13): 2116-2123.
ZHAO Dongmei, ZHANG Xu, WEI Juan, et al. Power grid fault diagnosis aiming at reproducing the fault process[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(13): 2116-2123.
- [11] 江雪晨,王大志,宁一,等. 电网故障最优诊断的查询方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1311-1316.
JIANG Xuechen, WANG Dazhi, NING Yi, et al. Query method for optimal diagnosis of power system faults[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(4): 1311-1316.
- [12] 梁文武,朱维钧,李辉,等. 基于粗糙集的智能变电站保护设备仿生故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(21): 132-140.

- LIANG Wenwu, ZHU Weijun, LI Hui, et al. A rough set-based bio-inspired fault diagnosis method for smart substation protection equipment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(21): 132-140.
- [13] SUN Q Y, WANG C L, WANG Z L, et al. A fault diagnosis method of smart grid based on rough sets combined with genetic algorithm and Tabu search[J]. Neural Computing and Applications, 2013, 23(7-8): 2023-2029.
- [14] 刘道兵, 郭莹莹, 李世春, 等. 考虑三段式线路保护主保护范围的电网故障诊断解析模型[J]. 电网技术, 2023, 47(5): 1905-1911.
- LIU Daobing, GUO Yingying, LI Shichun, et al. Analytical model of power grid fault diagnosis considering main protection range of three-section line protection[J]. Power System Technology, 2023, 47(5): 1905-1911.
- [15] 李钰洋, 王增平, 赵乔. 基于贝叶斯全解析模型与多因素降维的有源配电网分布式故障区段定位方法[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3917-3927.
- LI Yuyang, WANG Zengping, ZHAO Qiao. Distributed fault section location for ADN based on Bayesian complete analytic model and multi-factor dimension reduction[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3917-3927.
- [16] 赵维兴, 熊楠, 宁楠, 等. 基于多源信息融合的电网多层智能故障诊断方法[J]. 南方电网技术, 2021, 15(9): 9-15.
- ZHAO Weixing, XIONG Nan, NING Nan, et al. Multi-layer intelligent fault diagnosis method of power grid based on multi-source information fusion[J]. Southern Power System Technology, 2021, 15(9): 9-15.
- [17] 王宇, 徐长宝, 祝健杨, 等. 基于改进Petri网和Hilbert变换的多源信息融合电网故障诊断方法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(6): 125-129.
- WANG Yu, XU Changbao, ZHU Jianyang, et al. Grid fault diagnosis method for multi-source information fusion based on improved Petri net and Hilbert transform[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(6): 125-129.
- [18] 任鹏哲, 刘友波, 刘挺坚, 等. 基于互信息贝叶斯网络的配电网拓扑鲁棒辨识算法[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 55-62.
- REN Pengzhe, LIU Youbo, LIU Tingjian, et al. Robust identification algorithm for distribution network topology based on mutual-information Bayesian network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 55-62.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 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[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(10): 42-47.
- HE Xiaofei, TONG Xiaoyang, SUN Mingwei. Distributed power system fault diagnosis based on Bayesian network and Dempster-shafer evidence theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(10): 42-47.
- [22] 吴通华, 戴魏, 李新东, 等. 柔性直流配电网保护方案及设备研制[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(23): 123-130.
- WU Tonghua, DAI Wei, LI Xindong, et al. Protection scheme and device development of flexible DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(23): 123-130.
- [23] 杨乐, 秦文萍, 陈晓乾, 等. 基于限流控制与保护协同的柔性直流配电网整体保护方案[J]. 电网技术, 2022, 46(12): 4634-4646.
- YANG Le, QIN Wenping, CHEN Xiaoqian, et al. An overall protection scheme for flexible DC distribution lines based on the synergy of current limiting control and protection[J]. Power System Technology, 2022, 46(12): 4634-4646.
- [24] 郑峰, 张锦松, 林燕贞, 等. 基于新型柔性故障限流器的多端直流配电网故障隔离策略[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(1): 73-82.
- ZHENG Feng, ZHANG Jinsong, LIN Yanzhen, et al. Fault isolation strategy for multi-terminal DC distribution network based on novel flexible fault current limiter[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(1): 73-82.
- [25] 于华楠, 仇华华, 王鹤, 等. 基于改进半张量积贝叶斯网络的直流配电网故障诊断[J/OL]. 电测与仪表: 1-8[2023-08-26].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20230425.1411.010.html>.
- YU Huanan, QIU Huahua, WANG He, et al. Fault diagnosis of DC distribution network based on improved matrix half-tensor product Bayesian network[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation: 1-8[2023-08-26]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20230425.1411.010.html>.

收稿日期: 2023-06-25; 修回日期: 2023-10-30

作者简介:

王鹤(1983—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为柔性直流输电、新能源发电以及电力系统通信; E-mail: wanghe_nedu@163.com

韦搏(1998—), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统故障诊断; E-mail: 303849251@qq.com

李石强(1997—), 男, 通信作者, 博士, 主要研究方向为压缩感知、直流配电网故障定位. E-mail: neepu_lsq@163.com

(编辑 魏小丽)