

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190722

# 基于改进 D-S 证据理论的智能站保护二次回路故障诊断方法

戴志辉<sup>1</sup>, 鲁浩<sup>1</sup>, 刘媛<sup>1</sup>, 刘兵成<sup>1</sup>, 陈勇<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650500)

**摘要:** 当智能站继电保护二次回路存在故障时, 故障元件难以快速、有效地被识别。为此, 提出一种智能站保护二次回路故障诊断方法。首先, 根据 SCD 文件建立二次回路的物理回路和虚回路模型, 确立它们的映射关系。其次, 利用举证表法获得故障二次回路的可疑故障元件集合。然后, 利用改进 D-S 证据理论对可疑故障元件集合中的元件进行评估, 获得各元件导致回路故障的概率, 实现故障元件定位。最后, 算例分析表明该方法能够解决元件自检告警证据冲突过大的问题, 准确识别故障元件, 对继电保护运维工作具有参考价值。

**关键词:** 智能变电站; 继电保护; 二次回路; 故障诊断; 举证表

## A fault diagnosis method for the secondary circuits of protection systems in smart substations based on improved D-S evidence theory

DAI Zhihui<sup>1</sup>, LU Hao<sup>1</sup>, LIU Yuan<sup>1</sup>, LIU Bingcheng<sup>1</sup>, CHEN Yong<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China,  
2. Electric Power Research Institute of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650500, China)

**Abstract:** In smart substations, it is difficult to identify the faulty component quickly and effectively in the secondary circuit of protection systems. In view of this, a fault diagnosis method for secondary circuits of protection systems in smart substations is proposed to find faulty components accurately. First, the physical-loop and virtual-loop models of the secondary circuit are established according to the SCD file, and their mapping relationship is implemented. Secondly, a fault proof table is used to obtain the suspicious fault component set in secondary circuits of protection systems. Then, improved D-S evidence theory is proposed to evaluate the components in the suspicious component set, and the probability of secondary circuit failure caused by each component is obtained for the realization of fault component identification. Finally, case studies demonstrate that the proposed method can deal with excessive conflict of component self-checking evidence, find fault component accurately, and supply reference for the operation and maintenance of protection systems.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51877084), Natural Science Foundation of Hebei Province (No. E2018502063), and Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2017MS096).

**Key words:** smart substation; relay protection; secondary circuit; fault diagnosis; fault proof table

## 0 引言

基于 IEC61850 的智能站作为智能电网的关键环节<sup>[1-2]</sup>, 其实现了站内设备智能化、信息传递网络化、通信模型标准化<sup>[3]</sup>。智能站二次回路采用 IEC61850-9-2 组网以及基于“发布/订阅”机制的光

纤网络通信, 取代了常规变电站中由电缆组成的二次回路, 相对地简化了复杂的二次回路结构, 取得了一定的成效<sup>[4-5]</sup>。但是, 智能站保护二次回路在运行维护上也存在一些亟待解决的问题, 突出表现为: (1) 智能站虚回路的物理连接端口信息不明确导致虚回路与物理回路的拓扑关系难以对应<sup>[6]</sup>, 增加了运维人员的故障排查工作难度; (2) 一旦二次回路故障时, 运维人员依据通信状态逐一排查所有通信链路, 或花费大量的时间和精力从庞大的告警信息中分析故障原因, 工作繁琐而低效。为解决以上问题,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51877084); 河北省自然科学基金项目资助(E2018502063); 中央高校基本科研业务费项目资助(2017MS096)

迫切需要研究智能站保护二次回路故障诊断技术,提高智能站的运行和维护水平。

近年来,专家学者也提出了一些智能站保护二次回路的故障诊断方法,但这些方法存在一定的局限性。例如,文献[7-8]利用各虚回路通信状态确定二次回路故障范围,无法确定具体故障元件。文献[9]通过建立GOOSE回路的Petri网模型实现故障定位,但是该模型需要人工判断是否触发变迁。文献[10-12]建立了故障诊断数据库,应用专家系统进行IED和通信网络的故障诊断。但所用数据库的建模工作量较庞大,可移植性还需要进一步优化和改进。

基于对现状和应用的分析,本文提出了基于改进D-S证据理论的智能站保护二次回路故障诊断方法。首先,运用本文所提方法解析SCD文件获得物理回路信息和虚回路信息以及它们的映射关系,并在此基础上建立举证表。当发生故障时,依靠建立的举证表及各虚回路交叉、重叠的特性获得可疑故障元件集合。最后,以元件自检告警为证据源,利用改进D-S证据理论从可疑故障元件集合中确定具体故障元件,实现二次回路故障诊断。

## 1 二次回路模型

### 1.1 SCD文件

随着智能变电站通信技术的发展和IEC61850规约的应用,在智能变电站SCD配置文件(Substation Configuration Description, SCD)中,ExtRef元素具有描述虚回路信息的功能<sup>[13-15]</sup>,其字段如表1所示。

表1 ExtRef字段表

Table 1 ExtRef structural table

| 字段      | 作用                     |
|---------|------------------------|
| daName  | 输入信号属性标识               |
| doName  | 输入信号DO标识               |
| ldInst  | 输入所来自的逻辑设备实例名称         |
| lnClass | 输入信号符合相关标准的逻辑节点类       |
| iedName | 发送输入信号的智能设备标识          |
| lnInset | 发送输入信号的智能设备中本逻辑节点的实例标识 |
| Prefix  | 逻辑节点前缀                 |
| intAddr | 输入信号绑定的引用地址            |

由表1可以看出:解析SCD文件的ExtRef元素能获得各智能设备之间的连接关系,实现虚回路的可视化。但SCD文件的ExtRef元素信息不包含具体智能设备之间物理连接端口的信息,存在虚回路物理连接端口信息不明确的缺点。

### 1.2 继电保护二次回路模型

为解决虚回路的物理连接端口信息不明确的问题,本文提出智能变电站物理回路模型和虚回路

模型建立方法,及它们之间的映射关系。

#### 1) 物理端口连接关系

PhysConn是IEC61850-6为智能变电站设定的描述物理端口模型的元素,包含Port、Type、Plug和Cable这四个字段。Port字段记录本物理端口标识;Cable字段记录连接该物理端口的光纤(电缆)标识。当两个物理端口PhysConn元素的Cable字段相同时,表明这两个物理端口是通过该光纤(电缆)相连接的。

交换机作为中间转发端口,按照《智能变电站网络交换机技术规范》附录D进行建模<sup>[16]</sup>。“远方装置名称”属性表示连接的对侧IED名称和对侧的物理端口号。“本地端口”属性和“远方端口ID”属性采用“板卡号-端口号-VLANID”格式描述。前者表示交换机收到报文的物理端口信息,后者表示交换机发送报文的物理端口信息。

#### 2) 物理端口与虚端子关系

按照《继电保护IEC61850工程应用模型》<sup>[17]</sup>对PhysConn元素字段做了如下规定:(1)规定物理端口标识Port字段的命名方式为“板卡号-端口号”,例如“2-B”表示板卡2的B端口。(2)在ExtRef元素的intAddr字段中增加描述物理端口标识信息,虚端子与物理端口标识之间用“:”隔离。例如intAddr=<cbNamen:1-A:2-B:VLANID>中cbNamen为报文控制块,VLANID为VLAN的编号,该字段表明报文控制块cbNamen从板卡1的A端口发送至板卡2物理端口B,接收虚端子编号为VLANID。

### 1.3 虚回路与物理回路的映射

虚回路模型和物理回路模型是实现虚回路与物理回路映射的基础。虚、实回路映射方法的步骤如下所述。

1) 解析SCD文件,从Port字段和Cable字段中获取智能设备的物理端口标识和光纤(电缆)标识,形成物理端口信息表。例如,表2为某智能站母线保护装置P<sub>3</sub>和交换机SW<sub>0</sub>的物理端口信息表,P<sub>3</sub>的1-X端口连接光纤L<sub>10</sub>,交换机SW<sub>0</sub>的1-Y端口和1-Z端口分别连接光纤L<sub>10</sub>和L<sub>9</sub>。

表2 物理端口信息表

Table 2 Physical port information table

| IED             | 端口  | 光纤              |
|-----------------|-----|-----------------|
| P <sub>3</sub>  | 1—X | L <sub>10</sub> |
| SW <sub>0</sub> | 1—Y | L <sub>10</sub> |
| SW <sub>0</sub> | 1—Z | L <sub>9</sub>  |

2) 遍历物理端口信息表中所有物理端口,通过

光纤标识形成物理回路。例如, 表 2 中  $P_3$  的 1-X 端口和  $SW_0$  的 1-Y 端口都连接相同的光纤  $L_{10}$ , 从而确定  $P_3$  和  $SW_0$  通过光纤  $L_{10}$  连接。若某端口对侧连接交换机, 还需搜索该信息经交换机后的设备名称和端口号, 将该物理链路涉及的设备名称、端口标识和光纤标识作为该虚回路所对应的物理回路。

3) 解析 intAddr 字段, 获得物理回路与虚回路之间的映射。任意虚端子都能通过 intAddr 找到对应物理端口, 通过物理端口信息表查找连接该物理端口的光纤及对侧设备名称、端口等信息。用该方法就能将虚回路相关的设备、端口、通信光纤(电缆)对应起来, 完成虚回路与物理回路的映射。

## 2 二次回路故障范围识别

智能变电站各个虚回路有存在交叉、重叠的可能性, 故而某一虚回路上的通道通信正常, 则与该回路交叉、重叠的其他回路的交叉重叠部分是正常的<sup>[18-19]</sup>。反之, 若某一元件故障则可能导致多条虚回路通信中断<sup>[20]</sup>。通过举证表法对全网通信状态的分析, 可排除可疑故障二次回路上的正常元件, 确定故障范围, 以达到获得可疑故障元件集合的目的。

以表 3 为例说明该算法。表 3 中 A~D 代表不同的物理元件(通道元件、端口、智能设备等),  $G_1 \sim G_4$  表示 4 条虚回路, 虚回路通信状态为 1 表示通信异常, 通信状态为 0 表示通信正常。若本行虚回路不包含某元件, 则该元件对应的单元格为空; 若本行虚回路包含某元件, 则该元件对应单元格等于通信状态的值。

表 3 举证表法

Table 3 Fault proof table method

| 虚回路   | 通信状态 | 物理元件 |   |   |   |
|-------|------|------|---|---|---|
|       |      | A    | B | C | D |
| $G_1$ | 1    | 1    | 1 | 1 |   |
| $G_2$ | 0    |      |   |   | 0 |
| $G_3$ | 1    |      | 1 |   | 1 |
| $G_4$ | 0    | 0    |   |   |   |
| 举证值   |      | 0    | 2 | 1 | 0 |

举证值的求取规则如下: 当某物理元件一列没有 0 时, 举证值等于该列所有 1 之和, 例如, B 的举证值等于该列第一行和第三行之和, B 的举证值为 2。当某物理元件一列有 0 存在时, 举证值为 0, 例如, A 列第四行有 0, 证明 A 为正常元件, A 的举证值为 0。表 3 的算例利用举证表法只能确定 A 元件和 D 元件为正常元件, 无法确定 B 元件、C 元件是否故障, 故而可疑故障元件集合为  $\{B, C\}$ 。

## 3 二次回路故障元件识别方法

在第 2 节确定了故障范围, 获得可疑故障元件集合的基础上, 本节提出利用改进 D-S 证据理论从可疑故障元件集合中确定二次回路具体故障元件。

定义  $\Theta$  为识别框架, 由互斥穷举的命题组成<sup>[21-22]</sup>。本文的识别框架中的命题就是可疑故障元件集合中的各个元件故障。定义函数  $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ ,  $m(A)$  为基本概率分配函数(Basic Probability Assignment, BPA), 它表示证据对 A 的信任度<sup>[23]</sup>。BPA 有如下性质: (1)  $m(\phi) = 0$ 。(2)  $\sum_{A \in \Theta, A \neq \phi} m(A) = 1$ 。如果  $m(A) > 0$ , 则称 A 为焦点<sup>[24]</sup>。

### 3.1 元件自检告警数据库模型

元件自检告警数据库为多源异构数据集成数据库, 是 D-S 证据理论 BPA 生成的依据。数据源的选择、多源异构数据的处理方法和数据库存储格式的设计是该数据库模型的关键<sup>[25-27]</sup>。

本文选择智能电网调度技术支持系统 D5000、调度运行管理系统(Operation Management System, OMS)作为数据源, 对其中的数据按照规则进行抽取、处理并将结果存储到元件自检告警数据库, 该数据库模型如表 4 所示。

表 4 元件自检告警数据库模型

Table 4 Database system for component self-checking information

| 属性     | 数据类型      | 数据举例                | 来源        | 结构化数据 |
|--------|-----------|---------------------|-----------|-------|
| 序号     | INT       | 5                   | 自动        |       |
| 地区     | VARCHAR   | XX 市/XX 县           | D5000/OMS | 是     |
| 厂站     | VARCHAR   | XX 站                | D5000/OMS | 是     |
| 保护设备   | VARCHAR   | 母线保护(BP-2B)         | D5000/OMS | 是     |
| 告警元件   | VARCHAR   | 智能终端 2              | D5000     | 是     |
| 告警内容   | VARCHAR   | 装置异常                | D5000     | 是     |
| 告警时间   | TIMESTAMP | 2016-06-30/21:10:53 | D5000     | 是     |
| 实际故障元件 | VARCHAR   | 智能终端 2              | D5000     | 否     |
| 动作情况   | VARCHAR   | 误动                  | OMS       | 是     |

结构化数据按照存储规则进行存储。从 D5000 系统缺陷数据库中抽取的结构化数据属性为地区、厂站、告警时间。从 OMS 系统中抽取的结构化数据属性为地区、厂站、保护设备、动作情况、动作时间。对于非结构化数据, 在抽取数据后需进行处理才能存储。D5000 系统抽取保护异常情况、保护异常前站内异常情况、保护检验中发现的问题与处理情况及改进措施这两个非结构化属性。它们运用自然语言进行记录, 包含了保护设备、告警元件、告警内容和实际故障元件的信息, 目前没有较为成

熟的方法能够识别自然语言。因此,需对上文所载的两个属性进行人工解析、抽取有效信息并存储。

数据源匹配规则:数据源匹配规则能匹配来自不同数据源的相关记录,进行合并。故障引起的告警信号总是离散地分布在一个时间段内,因此可以设时间窗口为 8 s<sup>[28]</sup>。当 OMS 中保护跳闸记录 O<sub>1</sub> 的地区、厂站、保护设备与 D5000 系统中告警记录 D<sub>1</sub> 的对应数据相同,且 D<sub>1</sub> 告警时间和 O<sub>1</sub> 动作时间相差 8 s 以内时,认为告警记录 D<sub>1</sub> 的动作情况就是记录 O<sub>1</sub> 的动作情况。

综上所述,抽取 D5000 数据库和 OMS 数据库中的多源异构信息,按照数据类型分别处理,然后将这些数据进行匹配,从而建立统一的元件自检告警数据库,作为 BPA 的生成依据。

### 3.2 元件自检告警 BPA 生成方法

D-S 证据理论是建立在证据源对各个命题的 BPA 上的。本文提出元件自检告警 BPA 生成方法流程图如图 1 所示。该方法步骤如下所述。

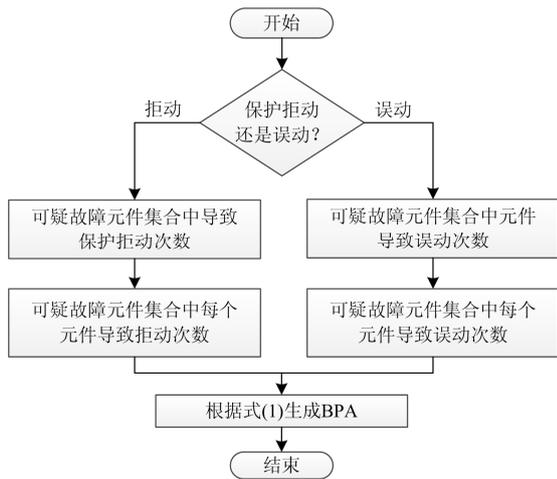


图 1 BPA 生成方法流程图

Fig. 1 BPA generation method flow

1) 当发生故障时,通过分析确定某二次回路对应的保护 H 是拒动还是误动。

2) 根据元件自检告警信息数据库查找并统计保护 H 由于可疑故障元件集合导致拒动(误动)次数。

3) 计算每个可疑故障元件的 BPA,计算方法如式(1)所示。

$$\text{BPA(某可疑元件)} = \frac{\text{某可疑元件导致拒动(误动)次数}}{\text{可疑元件集合导致拒动(误动)次数}} \quad (1)$$

通过元件自检告警 BPA 生成方法,就能获得每个证据源(元件自检告警)对每个可疑故障元件的 BPA,即该证据源认为每个元件作为保护二次回路

拒动(误动)原因的概率。

### 3.3 改进 D-S 证据理论原理

继电保护二次回路元件自检告警证据源给出的 BPA 容易出现证据冲突的现象,使用传统 Dempster 合成公式将产生违反常理的结果<sup>[29]</sup>。因此,本文根据继电保护二次回路元件自检告警证据源的特征,提出改进 D-S 证据理论合成规则解决故障诊断过程中出现的证据冲突问题。

设  $m_1、m_2、\dots、m_n$  为  $n$  个证据源,则证据源  $m_i$  和证据源  $m_j$  之间的冲突用  $k_{ij}$  来表示, $k_{ij}$  计算方法如式(2)所示。

$$k_{ij} = \sum_{A_x \cap A_y = \phi} m_i(A_x)m_j(A_y) \quad (2)$$

式中,  $A_x、A_y$  为证据源对应的不同命题,本文  $A_x、A_y$  代表可疑故障元件。

证据可信度  $\varepsilon$  为证据冲突因子平均值的减函数,当证据之间的冲突增大时,  $\varepsilon$  将降低,其计算方法如式(3)所示。

$$\varepsilon = e^{-\frac{2}{n(n-1)} \sum_{i < j} k_{ij}} \quad (3)$$

新的合成规则计算方法如式(4)所示。

$$\begin{cases} m(\phi) = 0 \\ q(A) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n m_i(A) \\ k = \sum_{\bigcap_{k=1}^n A_k = \phi} m_1(A_1)m_2(A_2)\dots m_n(A_k) \\ p(A) = \sum_{\bigcap_{k=1}^n A_k = A} m_1(A_1)m_2(A_2)\dots m_n(A_k) \\ m(A) = p(A) + k \times \varepsilon \times q(A) \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $k$  为冲突因子,它的大小反映了所有证据源的冲突程度;  $q(A)$  表示证据源对结论  $A$  的平均支持度<sup>[21-23]</sup>。  $m(A)$  为结论  $A$  的证据合成结果。从式(4)第二子式可以看出,当冲突较小时,冲突因子  $k$  极小( $k \rightarrow 0$ ),新合成公式中  $m(A)$  的结果主要由  $p(A)$  部分决定。当冲突较大时,冲突因子  $k$  接近 1( $k \rightarrow 1$ ),新合成公式中  $m(A)$  的结果主要由  $k \times \varepsilon \times q(A)$  决定。

Yager 将高度冲突的概率赋值给了未知部分  $X$ ,认为高度冲突证据无法参与结论的推导。与 Yager 改进公式相比,本文在举证表部分已经限定了可疑故障集合,没有未知部分  $X$ 。故而新的合成规则公式根据证据可信度  $\varepsilon$  的大小将高度冲突证据加入到合成公式中,证据源利用率更高。

整体上,本文所提智能站保护二次回路故障诊断方法的步骤如图 2 所示。

1) 初始化解析 SCD 文件获得物理回路信息表

和虚回路信息表, 完成虚回路和物理回路映射, 建立举证表。

2) 周期性检测继电保护有无故障, 如果继电保护有故障则跳到步骤 3)。

3) 利用虚回路通信状态结合举证表法获得可疑故障元件集合。

4) 通过改进 D-S 证据理论评估各可疑故障元件导致保护故障的可能性, 确定最可能导致继电保护故障的元件, 完成故障诊断, 回到步骤 2)。

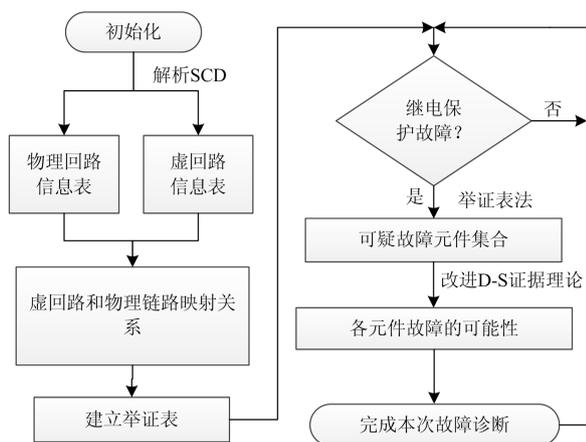


图 2 继电保护二次回路故障诊断步骤

Fig. 2 Fault diagnosis process of secondary circuits of protection system

#### 4 故障诊断方法验证

在单套保护的智能变电站中, 运用本文所提方法进行故障诊断即可。在双重化保护的智能变电站中, 则可通过对每一套保护单独进行故障诊断确定具体故障元件。

本文以 S 市 X 县 CZ 站(110 kV 智能变电站)为例对故障诊断方法进行验证, 继电保护物理二次回路图如图 3 所示。由图 3 可知该变电站继电保护二次回路共有 9 个元件, 12 条线路。L<sub>1</sub>—L<sub>12</sub> 为光纤; SW<sub>0</sub>—SW<sub>2</sub> 为交换机; MU 为合并单元; P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub> 为线路保护装置; P<sub>3</sub> 为母线保护装置; IED 为智能终端; CL 为测控单元, 通过交换机实现网络通信。

G<sub>1</sub>—G<sub>12</sub> 是 110 kV 智能站二次回路中的 12 条虚回路, 根据虚回路与物理回路映射方法得到每条虚回路对应物理回路上的元件, 如表 5 所示, 元件与端口之间用“.”隔开。例如, G<sub>7</sub> 虚回路是传输线路保护 P<sub>1</sub> 直采直跳信号的虚回路, MU 将采样值由 MU.1-B 端口通过 L<sub>1</sub> 传给 P<sub>1</sub>.1-A 端口, 保护装置 P<sub>1</sub> 接收到采样值后进行逻辑判断, 将是否跳闸信号由 P<sub>1</sub>.1-B 端口通过 L<sub>4</sub> 传给 IED.1-A 端口, IED 根据接

收信号动作。利用表 5 即可建立 CZ 站的举证表。

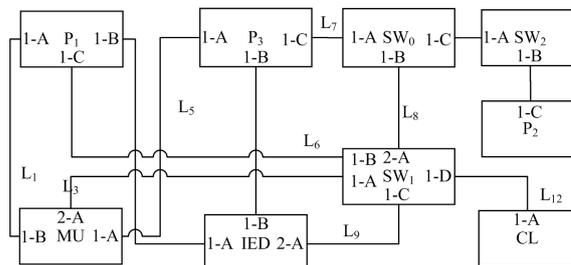


图 3 110 kV 智能变电站继电保护物理二次回路图

Fig. 3 Physical secondary circuit diagram of relay protection in 110 kV smart substations

表 5 虚回路与物理回路映射关系表

Table 5 Mapping relationship table of virtual and physical circuit

| 编号              | 虚回路       | 物理回路  |
|-----------------|-----------|---|
| G <sub>1</sub>  | 线路开关位置    | IED、IED.1-A、L <sub>4</sub> 、P <sub>1</sub> .1-B、P <sub>1</sub>  |
| G <sub>2</sub>  | 遥控        | CL、CL.1-A、L <sub>12</sub> 、SW <sub>1</sub> .1-D、SW <sub>1</sub> 、SW <sub>1</sub> .1-C、L <sub>9</sub> 、IED.2-A、IED   |
| G <sub>3</sub>  | 遥信        | IED、IED.2-A、L <sub>9</sub> 、SW <sub>1</sub> .1-C、SW <sub>1</sub> 、SW <sub>1</sub> .1-D、L <sub>12</sub> 、CL.1-A、CL   |
| G <sub>4</sub>  | 遥测        | MU、MU.2-A、L <sub>3</sub> 、SW <sub>1</sub> .1-A、L <sub>12</sub> 、SW <sub>1</sub> 、SW <sub>1</sub> .1-D、CL.1-A、CL   |
| G <sub>5</sub>  | 母差远跳      | P <sub>3</sub> 、P <sub>3</sub> .1-C、L <sub>7</sub> 、SW <sub>0</sub> .1-A、SW <sub>0</sub> 、SW <sub>0</sub> .1-B、L <sub>8</sub> 、线路 1 SW <sub>1</sub> .2-A、SW <sub>1</sub> 、SW <sub>1</sub> .1-B、L <sub>2</sub> 、P <sub>1</sub> .1-C、P <sub>1</sub>   |
| G <sub>6</sub>  | 母线保护直跳    | IED、IED.1-B、L <sub>6</sub> 、P <sub>3</sub> .1-B、P <sub>3</sub>  |
| G <sub>7</sub>  | 线路保护直采直跳  | MU、MU.1-B、L <sub>1</sub> 、P <sub>1</sub> .1-A、P <sub>1</sub> 、P <sub>1</sub> .1-B、L <sub>4</sub> 、IED.1-A、IED   |
| G <sub>8</sub>  | 母差直采      | MU、MU.1-A、L <sub>5</sub> 、P <sub>3</sub> .1-A、P <sub>3</sub>  |
| G <sub>9</sub>  | 母差刀闸位置    | IED、IED.1-B、L <sub>6</sub> 、P <sub>3</sub> .1-B、P <sub>3</sub>  |
| G <sub>10</sub> | 母差远跳      | P <sub>3</sub> 、P <sub>3</sub> .1-C、L <sub>7</sub> 、SW <sub>0</sub> .1-A、SW <sub>0</sub> 、SW <sub>0</sub> .1-C、L <sub>10</sub> 、线路 2 SW <sub>2</sub> .1-A、SW <sub>2</sub> 、SW <sub>2</sub> .1-B、L <sub>11</sub> 、P <sub>2</sub> .1-C、P <sub>2</sub> |
| G <sub>11</sub> | 电压切换      | MU、MU.2-A、L <sub>3</sub> 、SW <sub>1</sub> .1-A、SW <sub>1</sub> 、SW <sub>1</sub> .1-C、L <sub>9</sub> 、IED.2-A、IED  |
| G <sub>12</sub> | 线路 1 启动失灵 | P <sub>3</sub> 、P <sub>3</sub> .1-C、L <sub>7</sub> 、SW <sub>0</sub> .1-A、SW <sub>0</sub> 、SW <sub>0</sub> .1-B、L <sub>8</sub> 、SW <sub>1</sub> .2-A、SW <sub>1</sub> 、SW <sub>1</sub> .1-B、L <sub>2</sub> 、P <sub>1</sub> .1-C、P <sub>1</sub>        |

算例 1: 当 CZ 智能站某次继电保护误动时, 调度中心收到该智能变电站的两条告警信息: 合并单元 SV 中断告警 m<sub>1</sub> 和合并单元自检告警 m<sub>2</sub>, 虚回路 G<sub>4</sub>、G<sub>7</sub>、G<sub>8</sub>、G<sub>11</sub> 通信异常。

在 CZ 站举证表中, 虚回路 G<sub>4</sub>、G<sub>7</sub>、G<sub>8</sub>、G<sub>11</sub> 通信异常, 通信状态为 1, 每条虚回路对应物理回路上的元件对应单元格置 1。虚回路 G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>、G<sub>3</sub>、G<sub>5</sub>、G<sub>6</sub>、G<sub>9</sub>、G<sub>10</sub>、G<sub>12</sub> 通信正常, 通信状态为 0, 对应物理回路上的元件对应单元格置 0。运用举证值求取规则得到举证值如表 6 所示。

表 6 继电保护二次回路举证表

Table 6 Fault proof table of protection secondary circuit

| 物理元件               | 举证值 | 物理元件                | 举证值 | 物理元件                | 举证值 |
|--------------------|-----|---------------------|-----|---------------------|-----|
| MU                 | 4   | IED.1-B             | 0   | SW <sub>2.1-B</sub> | 0   |
| MU.1-A             | 1   | IED.2-A             | 0   | P <sub>2</sub>      | 0   |
| MU.1-B             | 1   | SW <sub>0.1-A</sub> | 0   | P <sub>2.1-C</sub>  | 0   |
| MU.2-A             | 2   | SW <sub>0</sub>     | 0   | L <sub>1</sub>      | 1   |
| P <sub>1</sub>     | 0   | SW <sub>0.1-B</sub> | 0   | L <sub>2</sub>      | 0   |
| P <sub>1.1-A</sub> | 1   | SW <sub>0.1-C</sub> | 0   | L <sub>3</sub>      | 2   |
| P <sub>1.1-B</sub> | 0   | SW <sub>1.1-A</sub> | 0   | L <sub>4</sub>      | 0   |
| P <sub>1.1-C</sub> | 0   | SW <sub>1</sub>     | 0   | L <sub>5</sub>      | 1   |
| P <sub>3.1-A</sub> | 1   | SW <sub>1.1-B</sub> | 0   | L <sub>6</sub>      | 0   |
| P <sub>3.1-B</sub> | 0   | SW <sub>1.1-C</sub> | 0   | L <sub>7</sub>      | 0   |
| P <sub>3</sub>     | 0   | SW <sub>1.1-D</sub> | 0   | L <sub>8</sub>      | 0   |
| P <sub>3.1-C</sub> | 0   | SW <sub>1.2-A</sub> | 0   | L <sub>9</sub>      | 0   |
| IED                | 0   | SW <sub>2</sub>     | 0   | L <sub>10</sub>     | 0   |
| IED.1-A            | 0   | SW <sub>2.1-A</sub> | 0   | L <sub>11</sub>     | 0   |
| L <sub>12</sub>    | 0   | —                   | —   | —                   | —   |

各个物理元件 MU、MU.1-A、MU.1-B、MU.2-A、P<sub>1.1-A</sub>、P<sub>3.1-A</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>5</sub> 的举证值分别为 4、1、

1、2、1、1、1、2、1，其他物理元件举证值为 0。因此，可疑故障元件集合为 {MU、MU.1-A、MU.1-B、MU.2-A、P<sub>1.1-A</sub>、P<sub>3.1-A</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>5</sub>}。由表 6 的举证表结果表明：举证表法能够充分利用虚回路通信状态信息，确定二次回路故障范围，获得可疑故障元件集合。

接下来利用改进 D-S 证据理论就能实现更加准确的故障诊断，确定具体故障元件。

BPA 是改进 D-S 证据理论的基础，故而先根据元件自检告警信息计算各个可疑故障元件的 BPA。用 3.1 节方法从 D5000 和 OMS 系统中抽取数据并处理，建立元件自检告警数据库。然后，筛选地区 = “S 市/X 县”、厂站 = “CZ 站”、告警元件 = “合并单元”、告警内容 = “合并单元 SV 中断告警”、动作情况 = “误动”、实际元件元件 ∈ {MU、MU.1-A、MU.1-B、MU.2-A、P<sub>1.1-A</sub>、P<sub>3.1-A</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>5</sub>} 的元件自检告警信息记录。本次筛选结果共有 25 条，其中实际故障元件为 MU、MU.1-A、MU.1-B、MU.2-A、L<sub>1</sub>、L<sub>5</sub> 的记录条数分别为 12、3、4、4、1、1，部分筛选记录的结果如表 7 所示。

表 7 m<sub>1</sub> 的元件自检告警数据库筛选部分结果

Table 7 Partial screening result in database system of component self-checking information for alarm m<sub>1</sub>

| 序号 | 地区      | 厂站   | 保护设备           | 告警元件 | 告警内容         | 告警时间                | 实际故障元件            | 动作情况 |
|----|---------|------|----------------|------|--------------|---------------------|-------------------|------|
| 1  | S 市/X 县 | CZ 站 | P <sub>1</sub> | 合并单元 | 合并单元 SV 中断告警 | 2018-05-16/16:58:37 | 合并单元 MU           | 误动   |
| 2  | S 市/X 县 | CZ 站 | P <sub>3</sub> | 合并单元 | 合并单元 SV 中断告警 | 2016-07-13/22:17:32 | 光纤 L <sub>1</sub> | 误动   |
| 3  | S 市/X 县 | CZ 站 | P <sub>3</sub> | 合并单元 | 合并单元 SV 中断告警 | 2015-05-27/22:17:32 | 合并单元 MU           | 误动   |

根据上文结果再利用式(1)就可以求得 m<sub>1</sub> 对 MU、MU.1-A、MU.1-B、MU.2-A、P<sub>1.1-A</sub>、P<sub>3.1-A</sub>、L<sub>1</sub>、L<sub>3</sub>、L<sub>5</sub> 的基本概率分配结果分别为 48%、12%、16%、16%、0、0、4%、0、4%，如图 4 所示。

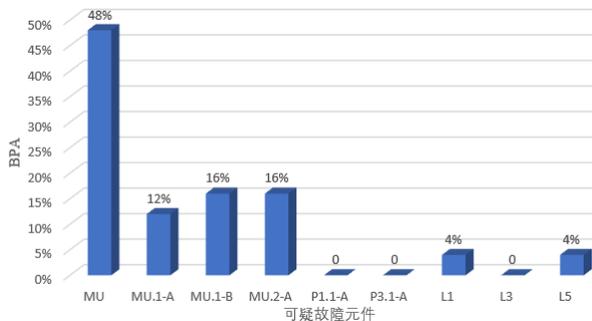


图 4 证据源 m<sub>1</sub> 的 BPA

Fig. 4 BPA from m<sub>1</sub>

同理，设置告警内容为“合并单元自检告警 m<sub>2</sub>”，筛选到 32 条记录。其中实际故障元件为 MU、MU.1-A、MU.1-B、MU.2-A、P<sub>1.1-A</sub>、P<sub>3.1-A</sub>、L<sub>1</sub>、

L<sub>3</sub>、L<sub>5</sub> 的记录条数分别为 20、4、4、3、1、1，计算得到它们的基本概率分配结果分别为 62.5%、12.5%、12.5%、9.375%、0、0、3.125%、0、0，如图 5 所示。

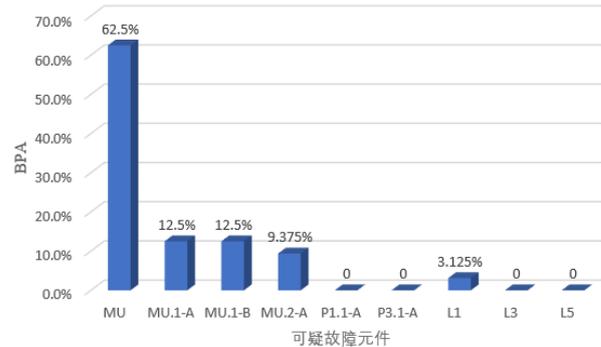


图 5 证据源 m<sub>2</sub> 的 BPA

Fig. 5 BPA from m<sub>2</sub>

将图 4、图 5 中证据源 m<sub>1</sub> 的 BPA 和证据源 m<sub>2</sub> 的 BPA 代入式(2)可得 m<sub>1</sub> 和 m<sub>2</sub> 之间的冲突

$k_{12}=0.6488$ 。运用式(3)可得证据可信度  $\varepsilon=0.5227$ 。最后, 将  $k_{12}$ 、 $\varepsilon$  和相应的 BPA 代入式(4), 得到每个可疑故障元件的合成结果, 如图 6 所示。

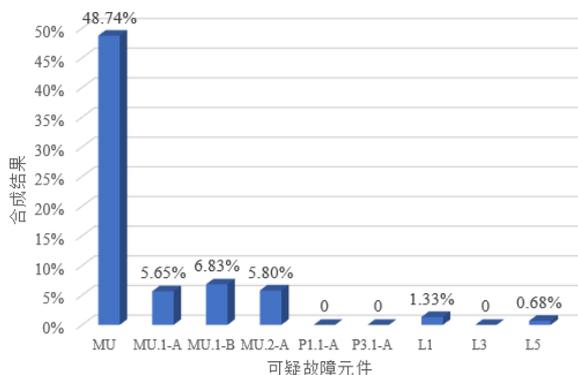


图 6 证据源  $m_1$  和  $m_2$  的合成结果

Fig. 6 Composite result for  $m_1$  and  $m_2$

由图 6 可以看出: 可疑故障元件集合中的  $P_{1.1-A}$ 、 $P_{3.1-A}$ 、 $L_3$  的合成结果为 0, 即这三个物理元件不是导致继电保护二次回路故障的原因。合并单元 MU 的合成结果最大, 为 48.74%。端口 MU.1-A、端口 MU.1-B 和端口 MU.2-A 合成结果分别为 5.65%、6.83%和 5.80%; 光纤  $L_1$ 、 $L_5$  的合成结果较小, 分别为 1.33%、0.68%。

这些端口和光纤的合成结果远小于合并单元的合成结果。因此, 故障诊断的结果为合并单元 MU 装置本身故障是最可能导致保护误动的物理元件。检修人员应优先对合并单元 MU 装置本身进行排查、维修。

算例 2: 为说明方法的适应性, 当 CZ 站某次保护拒动时,  $G_1$ 、 $G_7$  虚回路的通信状况异常, 其他虚回路通信状况正常, 调度中心收到以下告警信息: 保护装置 GOOSE 链路中断  $m_3$ 、智能终端 GOOSE 链路中断  $m_4$ 、 $L_4$  通信链路故障  $m_5$ 。

利用表 5 建立举证表, 将  $G_1$ 、 $G_7$  通信状态置 1, 其他虚回路通行状态置 0, 可得  $P_{1.1-B}$ 、 $L_4$ 、 $IED_{1.1-A}$  的举证值分别为 2、2、2, 其他元件的举证值为 0, 即故障元件集合为  $\{P_{1.1-B}$ 、 $L_4$ 、 $IED_{1.1-A}\}$ 。

从元件自检告警信息数据库中筛选出与告警信息  $m_3$ 、 $m_4$ 、 $m_5$  相关的记录条数分别为 12、11、6 条; 利用式(1)求得各数据源  $m_3$ 、 $m_4$ 、 $m_5$  对  $P_{1.1-B}$ 、 $L_4$ 、 $IED_{1.1-A}$  的基本概率分配结果如表 8。

将表 8 中的 BPA 代入式(2)得  $m_3$ 、 $m_4$ 、 $m_5$  三个证据源之间的冲突为  $k_{34}=0.6515$ 、 $k_{35}=0.6528$ 、 $k_{45}=0.5606$ 。将  $k_{34}$ 、 $k_{35}$ 、 $k_{45}$  代入式(3)可得证据可信度  $\varepsilon=0.5582$ 。最后, 将  $k_{34}$ 、 $k_{35}$ 、 $k_{45}$ 、 $\varepsilon$  以及 BPA 代入式(4), 得到各可疑故障元件的合成结果为为

$m(P_{1.1-B})=13.76\%$ 、 $m(L_4)=31.87\%$ 、 $m(IED_{1.1-A})=5.12\%$ 。光纤  $L_4$  的合成结果最大, 即故障诊断结果为光纤  $L_4$  故障是最可能导致保护拒动的物理元件。检修人员应立即对光纤  $L_4$  进行排查, 若确实为光纤  $L_4$  故障则立即启动备用光纤或及时维修。

表 8 证据源  $m_3$ 、 $m_4$ 、 $m_5$  的基本概率分配及合成结果表

|        | $P_{1.1-B}$ | $L_4$  | $IED_{1.1-A}$ |
|--------|-------------|--------|---------------|
| $m_3$  | 41.67%      | 33.33% | 25.00%        |
| $m_4$  | 36.36%      | 45.45% | 18.18%        |
| $m_5$  | 16.67%      | 83.33% | 0             |
| 改进合成公式 | 13.76%      | 31.87% | 5.12%         |

对于保护二次回路的其它故障, 与上述算例类似, 可利用所提方法首先确定二次回路可疑故障元件集合, 然后定位具体故障元件。

## 5 结论

针对智能变电站继电保护二次回路故障信息量少、故障诊断困难的问题, 提出了一种智能站保护二次回路故障诊断方法, 其具有如下特点:

- 1) 目前继电保护二次回路的故障诊断常用方法只能确定故障范围, 而所提方法在能确定故障范围和具体的故障元件。
- 2) 克服了使用证据理论在故障定位过程中存在的证据之间的冲突性问题。
- 3) 能在线、有效地对智能站保护二次回路进行故障诊断、确定具体故障元件, 帮助检修人员减少故障排查量、提高运维效率。

## 参考文献

- [1] 高翔, 张沛超, 章坚民. 电网故障信息系统应用技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [2] 刘振亚. 智能电网技术 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [3] SWAGATA D, SUNDARAVARADAN A, SURYA S. Relay performance verification using fault event records[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 226-235. DOI: 10.1186/s41601-018-0094-0.
- [4] 王有元, 蔡亚楠, 王灿, 等. 基于云平台的变电站设备智能诊断系统 [J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 3895-3901.
- [5] WANG Youyuan, CAI Yanan, WANG Can, et al. Intelligent diagnosis system for substation equipment based on cloud platform[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(12): 3895-3901.
- [5] 叶远波, 谢民, 王嘉琦, 等. 基于 Markov 模型与 GO 法

- 的智能变电站继电保护系统实时可靠性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 47-55.
- YE Yuanbo, XIE Min, WANG Jiaqi, et al. Real time reliability analysis of relay protection system in intelligent substation based on Markov model and GO method[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 47-55.
- [6] 李瑞生, 李燕斌, 周逢权, 等. 智能变电站功能架构及设计原则[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 24-27.
- LI Ruisheng, LI Yanbin, ZHOU Fengquan, et al. Every week right smart substation functional architecture and design principles[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(21): 24-27.
- [7] 高磊, 杨毅, 刘均, 等. 基于举证表的智能变电站过程层通道故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 147-151.
- GAO Lei, YANG Yi, LIU Yu, et al. Proof table based fault location method for process level channel in smart substations[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 147-151.
- [8] 董怀普, 王位杰, 刘文彪, 等. 基于深度搜索的二次虚实回路融合故障诊断技术[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 219-223.
- DONG Huaipu, WANG Weijie, LIU Wenbiao, et al. Fault diagnosis technology of secondary virtual loop and physical fiberloop fusion based on depth first search[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 219-223.
- [9] 周红阳, 黄佳胤, 张弛, 等. 基于Petri网的智能变电站GOOSE回路故障诊断[J]. 南方电网技术, 2017, 11(6): 49-56.
- ZHOU Hongyang, HUANG Jiayin, ZHANG Chi, et al. Petri net based fault diagnosis for GOOSE circuits of smart substation[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(6): 49-56.
- [10] 聂德楨. 智能变电站二次系统故障诊断方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
- NIE Dezhen. Research on secondary system fault diagnosis method in intelligent substation[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [11] 王保民. 智能变电站故障信息综合分析决策系统的研究与应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2012.
- WANG Baomin. Research and application of fault information comprehensive analysis and decision-making system in intelligent substation[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2012.
- [12] 吴杰, 姜振超. 智能变电站保护与控制障碍在线诊断与预测方法研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(5): 70-76.
- WU Jie, JIANG Zhenchao. On-line diagnosis and prediction method of protection and control obstacles in smart substations[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(5): 70-76.
- [13] 田力智. 智能变电站SCD虚连接辅助设计关键技术的研究与开发[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
- TIAN Lizhi. Research and development on key techniques of virtual links auxiliary design in intelligent substation SCD[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [14] 高兆丽. 智能变电站过程层故障诊断与状态评估技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2015.
- GAO Zhaoli. Technical research on process level fault diagnosis and condition assessment in intelligent substation[D]. Jinan: Shandong University, 2015.
- [15] 徐彪, 尹项根, 张哲, 等. 基于拓扑建模的电网故障诊断优化模型[J]. 电网技术, 2018, 42(10): 3241-3248.
- XU Biao, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. Topological modeling based optimal model for power grids fault diagnosis[J]. Power System Technology, 2018, 42(10): 3241-3248.
- [16] 国家电网公司. 继电保护 IEC 61850 工程应用模型: GB/T 32890—2016[S]. 北京: 中国电力出版社, 2016.
- State Grid Corporation of China. Data model of protective relays based on IEC 61850: GB/T 32890—2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.
- [17] 国家电网公司. 智能变电站网络交换机技术规范: Q/GDW 429—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- State Grid Corporation of China. The technical specification for ethernet LAN switch in smart substation: Q/GDW 429—2010[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [18] 戴志辉, 谢军, 葛红波, 等. 考虑报文影响的集中式保护系统可靠性分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(11): 75-82.
- DAI Zhihui, XIE Jun, GE Hongbo, et al. Reliability analysis of centralized protection system considering message impact[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2018, 30(11): 75-82.
- [19] HE Jinghan, LIU Lin, LI Wenli, et al. Development and research on integrated protection system based on redundant information analysis[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(2): 108-120. DOI: 10.1186/s41601-016-0024-y.
- [20] YANG Ting, ZHAO Rui, ZHANG Weixin, et al. On the modeling and analysis of communication traffic in intelligent electric power substations[J]. IEEE Transactions

- on Power Delivery, 2016, 32(3): 1329-1338.
- [21] 陈国炎, 张哲, 尹项根, 等. 基于证据理论融合的广域后备保护新方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 246-255.  
CHEN Guoyan, ZHANG Zhe, YIN Xianggen, et al. A new algorithm of wide area backup protection based on evidence theory fusion[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 246-255.
- [22] BI Wenhao, ZHANG An, YUAN Yuan. Combination method of conflict evidences based on evidence similarity[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2017, 28(3): 503-513.
- [23] 汪永伟, 赵荣彩, 常德显, 等. 一种基于改进证据理论的推理决策方法[J]. 计算机科学, 2014, 41(12): 24-29.  
WANG Yongwei, ZHAO Rongcai, CHANG Dexian, et al. Reasoning decision method based on improved theory of evidence[J]. Computer Science, 2014, 41(12): 24-29.
- [24] 张静. 基于 D-S 证据理论的高压断路器故障诊断[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.  
ZHANG Jing. Fault diagnosis of high voltage circuit breaker based on D-S evidence theory[J]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [25] 闫丽梅, 周忠媛, 徐建军, 等. 基于告警时序的输电设备故障定位方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(7): 38-48.  
YAN Limei, ZHOU Zhongyuan, XU Jianjun, et al. Research on the method of fault location of transmission device based on time series of alarm[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(7): 38-48.
- [26] 邓飞. 基于的电力系统警报处理信息模型建立与算法研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.  
DENG Fei. Information model building and algorithm research for power system alarm processing based on IEC61850[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [27] 张延旭. 智能变电站继电保护系统的信息流建模与可靠性提升策略[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- [28] 李江林, 史志鸿, 赵成功, 等. 一种基于 FPN 的变电站故障推理机制[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(17): 13-18.  
LI Jianglin, SHI Zhihong, ZHAO Chenggong, et al. Fault reasoning mechanism for substation based on FPN[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(17): 13-18.
- [29] SUN Renliang, DENG Yong. A new method to identify incomplete frame of discernment in evidence theory[J]. IEEE Access, 2019, 7: 15547-15555.

收稿日期: 2019-06-24; 修回日期: 2019-08-12

作者简介:

戴志辉(1980—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统保护与控制;

鲁浩(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护及其可靠性. E-mail: protectev.happy@163.com

(编辑 姜新丽)