

DOI: 10.7667/PSPC170895

# 基于改进证据理论融合的站域后备保护算法

蒋红亮, 吕飞鹏

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 针对站域后备保护(SABP)信息同步性要求高和容错性低等问题, 提出了一种基于改进证据理论融合的 SABP 算法。首先, SABP 装置根据全站各线路两端传统主/后备保护和方向元件动作情况识别疑似故障线路, 并由各疑似故障线路两端保护信息构成证据融合信息域。然后, 搜集证据融合信息域内的主/后备保护和方向元件动作信息, 经预处理后形成证据组并计算各证据的基本概率赋值, 利用改进证据理论对证据信息进行融合判断来实现故障线路的识别。算例仿真表明, 该 SABP 算法具有无需信息同步、站域信息交互的通信量小和信息容错性高等特点, 能有效改善 SABP 性能。

**关键词:** 站域后备保护; 故障识别; 信息融合; D-S 证据理论

## An algorithm of substation-area backup protection based on improved evidence theory fusion

JIANG Hongliang, LÜ Feipeng

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Aiming at the problems such as high synchronization requirement of information and low fault tolerance of Substation-Area Backup Protection (SABP), an algorithm of SABP based on improved evidence theory fusion is proposed. Firstly, the SABP device identifies the suspected fault lines according to action information of the traditional main/backup protection and direction component at both ends of all substation lines, and forms the evidence fusion information domain using the protection information at both ends of the suspected fault lines. Then, the evidence group is formed by preprocessing the collected the action information of main/backup protection and direction component in the evidence fusion information domain, and the basic probability assignment of each evidence is calculated. The SABP device identifies the fault line by improved evidence theory fusion with the evidence information. The simulation results show that the proposed SABP algorithm has the characteristics of no requirement of information synchronization, small substation-area interactive communication traffic and high information fault tolerance, and can effectively improve the performance of SABP.

**Key words:** substation-area backup protection; fault identification; information fusion; D-S evidence theory

## 0 引言

变电站传统继电保护通常按间隔分布式配置, 仅能利用有限的本地信息, 使得其后备保护性能的改善受到制约, 且愈加不能适应复杂互联电网的发展要求。而智能变电站具有站内信息高度共享的优势, 综合利用站内多间隔电气量信息以及相邻变电站信息来判断故障的站域后备保护可有效地提高后备保护性能<sup>[1-6]</sup>。

目前, 对于站域后备保护算法的研究主要有以下四种: 1) 基于方向比较原理的站域后备保护算法<sup>[7-8]</sup>, 这类算法通过比较站域范围内各元件的方向元件信

息实现故障识别; 2) 基于多 Agent 技术的站域后备保护算法<sup>[9]</sup>, 这类算法可在运行方式改变时自适应调整保护定值, 提高了保护灵敏度; 3) 基于多端电气量信息的站域电流差动后备保护算法<sup>[10-12]</sup>, 这类算法对采样同步性要求高, 实际工程应用存在难度; 4) 基于在线自适应整定原理的单端电气量信息的站域后备保护算法<sup>[13]</sup>, 这类算法通过对站域范围内各元件的自适应电流保护动作信息进行融合实现了算法较高容错性。

由于站域后备保护需要利用本站内以及相邻站的多点信息, 在测量和通信等环节难免出现数据失真、信息缺失或错误的情况<sup>[14-15]</sup>。另外, 已有的大

多数站域后备保护算法对信息容错性低, 往往只能在信息完全正确或只有单一信息缺失情况下才能实现故障元件识别, 因此, 如何提高站域后备保护的容错性能值得深入研究。基于此, 本文提出了一种基于改进证据理论融合的站域后备保护算法。站域后备保护装置根据全站各线路两端传统主/后备保护和方向元件动作情况识别疑似故障线路并形成证据融合信息域, 搜集证据融合信息域内的传统主后备保护和方向元件动作信息, 经预处理后形成证据组并计算各证据的基本概率赋值, 通过改进证据理论对证据信息进行融合, 进而识别故障元件。最后基于 IEEE14 节点标准系统进行仿真, 验证了算法具有无需信息同步、站域通信量小和容错性高等良好性能。

## 1 站域后备保护系统结构

基于智能化一次设备、网络化二次设备和统一化标准信息共享平台, 智能变电站实现了信息采样数字化、通信平台网络化和信息共享标准化, 为提高和改善后备保护性能提供了良好条件<sup>[16]</sup>。智能变电站系统结构分为三层: 站控层、间隔层和过程层。站域后备保护装置配置于间隔层, 通过与间隔层其他保护装置的信息交互获取传统主/后备保护动作信息, 通过过程层网获取全站方向元件动作信息, 通过站控层网与站控层进行信息交互。此外, 站域后备保护装置还需通过数据通道获取相邻站的部分信息。为了提高保护系统的可靠性和稳定性, 站域后备保护装置应采用双重化配置方式, 两套互为备用工作, 其系统结构如图 1 所示。

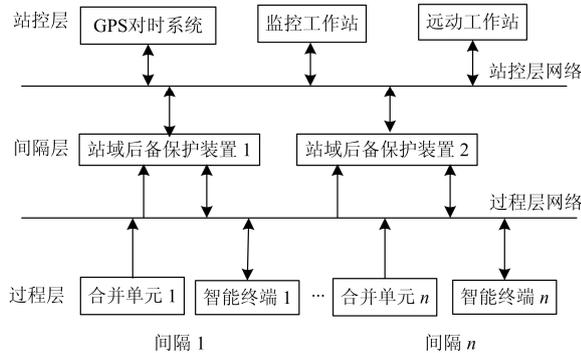


图 1 站域后备保护系统结构图

Fig. 1 Structure of substation backup protection system

## 2 DS 证据理论及其改进模型

### 2.1 DS 证据理论的概要

Dempster-Shafer(D-S)证据理论源于 20 世纪 60

年代, 是传统概率理论的一种拓展, 能很好地把握问题的未知性和不确定性, 因而在信息融合等领域获得广泛认同和应用<sup>[17]</sup>。设  $\Theta$  为一个有限集合, 且其中的元素两两互斥, 则称  $\Theta$  为识别框架。由待确定故障线路  $L_i$  构成本文的识别框架。若函数  $m: 2^\Theta \rightarrow [0,1]$  ( $2^\Theta$  为  $\Theta$  幂集) 满足以下条件:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0, & \emptyset \text{ 为空集} \\ \sum_{A \subseteq \Theta, A \neq \emptyset} m(A) = 1, & \forall A \subseteq \Theta \end{cases} \quad (1)$$

则称  $m(A)$  为命题  $A$  的基本概率赋值 (Basic Probability Assignment, BPA), 表示证据对  $A$  的直接支持程度。

设证据组由  $\Theta$  内  $n$  组独立的证据  $m_1, m_2, \dots, m_n$  组成, 则 D-S 合成公式为

$$m(A) = \begin{cases} \frac{\sum_{\cap A_j = A, 1 \leq j \leq n} \prod m_j(A_j)}{1 - K} & A \neq \emptyset \\ 0 & A = \emptyset \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $K = \sum_{\cap A_j = \emptyset, 1 \leq j \leq n} \prod m_j(A_j)$  为证据冲突因子。

文献[18]指出冲突因子  $K$  是最基本的证据冲突衡量方法, 但在部分情况下不能准确反映证据间的冲突程度, 提出奇异值方法衡量证据冲突程度具有更好的适应性。因此, 本文采用奇异值方法衡量证据之间的冲突程度。

设识别框架为  $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ ,  $m_1$  和  $m_2$  为识别框架上的两个 BPA, 证据冲突定义为

$$V(m_1, m_2) = \min \sigma(\mathbf{M} \cdot \mathbf{D}) \quad (3)$$

式中:  $\sigma(*)$  为矩阵  $*$  的奇异值;  $\mathbf{M}$  为  $m_1$  和  $m_2$  的 mass 矩阵;  $\mathbf{D}$  为修正矩阵, 两者分别定义为

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_1(A_1) & m_1(A_2) & \dots & m_1(A_{2^n}) \\ m_2(A_1) & m_2(A_2) & \dots & m_2(A_{2^n}) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{D}(A, B) = \frac{|A \cap B|}{|A \cup B|}, \quad A, B \subseteq \Theta \quad (5)$$

证据冲突程度是证据合成规则选取的依据, 证据间的冲突程度较小, 一般小于 0.5<sup>[19]</sup>, 按照式(2)合成可以得到预期结果。但当证据之间冲突程度较高 ( $V_{ij} \geq 0.5$ ) 时, 采用式(2)可能得不到满意的融合结果。另外, 证据理论还存在“一票否决”现象, 即任一证据分配给某一命题 BPA 为 0 时, 合成结果中该命题的基本信任值为 0。因此, 需要提出 DS 证据理论改进模型。

### 2.2 DS 证据理论改进模型

为了实现对高度冲突证据的有效融合, 使合成结果仍能与事实相符, 引入证据的可信度对证据进

行预处理后, 再通过 DS 证据理论合成法则进行数据融合。 $A_k$  为识别框架  $\Theta$  内的元素, 定义两条证据关于命题  $A_k$  的相容系数为

$$R_{ij}(A_k) = \frac{m_i(A_k) \times m_j(A_k)}{0.5 \times [m_i(A_k)^2 + m_j(A_k)^2]} \quad (6)$$

式中,  $R_{ij}(A_k)$  表示关于命题  $A_k$  两证据的相容程度, 证据与自身完全相容, 即  $R_{ii}(A_k) = 1$ 。

证据的可信度取决于该证据与其他证据的相容程度。已知  $n$  条证据, 可构建一个关于命题  $A_k$  的证据相容程度方阵如式(7)。

$$R = \begin{pmatrix} 1 & R_{12} & \cdots & R_{1n} \\ R_{21} & 1 & \cdots & R_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{n1} & R_{n2} & \cdots & 1 \end{pmatrix}_{n \times n} \quad (7)$$

则证据  $i$  的绝对相容度为相容方阵的第  $i$  行之和。

$$D_i(A_k) = \sum_{j=1, i \neq j}^n R_{ij}(A_k) \quad (8)$$

证据  $i$  的绝对相容度可以反映证据  $i$  同其他证据的相容程度,  $D_i(A_k)$  的值越大, 说明证据  $i$  与其他证据的一致性越好, 即该证据越可信。特别地, 各个证据之间意见高度统一, 则有理想相容度为  $n-1$ 。因此, 各证据关于命题  $A_k$  的可信度为

$$R_i(A_k) = \frac{D_i(A_k)}{n-1} \quad (9)$$

在确定了证据  $i$  关于命题  $A_k$  可信度后, 就可以对原始证据进行预处理。设原始证据  $i$  分配给命题  $A_j$  的 BPA 为  $m_i(A_j)$ , 预处理后的 BPA 为  $m_i''(A_j)$ :

$$\begin{cases} m_i''(A_j) = m_i(A_j) R_i(A_j), & A_j \neq \Theta \\ m_i''(\Theta) = 1 - \sum_{j=1}^N m_i(A_j) R_i(A_j), & A_j \neq \Theta \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $N$  为识别框架  $\Theta$  内命题的个数。

对原始证据源进行预处理后, 再代入式(2)DS 合成公式进行证据融合, 能够克服证据理论存在的问题, 得到较为满意的融合结果。

### 3 基于改进证据理论的站域后备保护算法

#### 3.1 冗余保护信息证据的合理选取

基于双端电气量保护原理的传统主保护和由线路两端方向元件构成的方向元件比较保护<sup>[16]</sup>能准确区分线路是否故障, 可直接作为线路故障与否的证据。而距离保护作为基于单端电气量的传统后备保护, 需要综合考虑距离保护 I、II 和 III 段的动作情况经处理后才能作为证据。因此, 选取线路两

端传统主保护、方向元件比较保护和距离保护动作信息用于形成证据融合的证据。保护动作值“1”表示, 保护未动作值“0”表示。传统主保护、方向元件比较保护和传统后备保护动作信息作为判断线路故障的证据, 由于它们基于不同的保护原理满足相互独立性, 即证据具有相互独立性, 可以使用证据理论进行证据融合。

#### 3.2 证据融合信息域的形成

线路是否故障与线路两端主保护、距离保护和方向元件比较保护动作情况密切相关。在图 2 中, 站域保护范围如虚线所示, 变电站  $S$  的线路  $L_2$  靠近母线  $B_2$  的  $f$  点故障时, 母线  $B_2$  所连线路  $L_2$ 、 $L_3$ 、 $L_4$  两端主保护、距离保护 I 和 II 段和方向元件比较保护已动作的总数量分别为 6 个、1 个、1 个, 即已动作保护总数量为 8 个; 其他母线所连线路两端主保护、距离保护 I 和 II 段和方向元件比较保护均未动作, 即已动作保护总数量为零。因此, 本文将各母线所连线路两端各保护已动作数量求和, 其中最大者为故障线路所连的母线, 并将该母线所连线路确定为疑似故障线路, 并由所有疑似故障线路两端的主保护、距离保护和方向元件动作信息组成证据融合信息域。 $f$  点故障时, 疑似故障线路由  $\{L_2, L_3, L_4\}$  组成, 证据融合信息域由 6、7、8、9、10 和 11 处主保护、距离保护和方向元件动作信息组成。

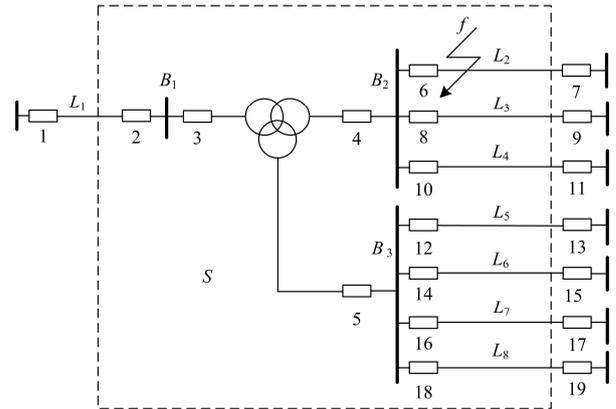


图 2 变电站接线图

Fig. 2 Connection diagram of substation

#### 3.3 保护信息 BPA 的计算

对于主保护和方向元件比较保护可以反映本线路全长范围内的故障情况, 因此若主保护和方向元件比较保护动作, 相应线路故障的 BPA 赋值为 1。距离保护的 I 段、II 段和 III 段的正常动作组合为以下四种情况: ① I—III 段均动作; ② II—III 段动作, I 段未动作; ③ III 段动作, I—II 段未动作; ④ I—III 段均未动作。在证据融合信息域中, 对于相邻站

的距离保护(如图 2 中 7、9 和 11 处的距离保护),若出现其他组合情况或动作信息丢失情况,则均为异常动作情况,该距离保护不参与证据理论信息融合;对于本站的距离保护(如图 2 中 6、8 和 10 处的距离保护),只有动作组合为①和④时,才参与证据信息融合。

距离保护的 BPA 需根据保护的動作情况和各段的保护范围在本线路和正方向邻线分配。设距离 I 段和 II 段的保护范围分别  $P_{L-1}$  和  $P_{L-2}$ , 则  $x_1=1, y_1=0, x_2=(1-P_{L-1})/(P_{L-2}-P_{L-1}), y_2=1-x_2, x_3=0, y_3=1$ , 距离保护 BPA 值如表 1 所示, 其中  $i$  为三段式距离保护 ①—③ 动作组合情况。

表 1 距离保护的 BPA 分配值

Table 1 Assigned value for BPA of distance protection

| 动作组合情况 | 本线路的 BPA |       | 邻线的 BPA |       |
|--------|----------|-------|---------|-------|
|        | 正常       | 故障    | 正常      | 故障    |
| ①—③    | $1-x_i$  | $x_i$ | $1-y_i$ | $y_i$ |
| ④      | 1        | 0     | 1       | 0     |

### 3.4 站域后备保护算法的步骤及决策

基于改进证据理论融合的故障识别算法流程图如图 3 所示, 主要步骤如下: 1) 搜索疑似故障线路。将变电站各母线所连线路两端主保护、距离保护 I 和 II 段和方向元件比较保护已动作数量求和, 其中最大者为故障线路所连的母线, 并将该母线所连线路确定为疑似故障线路。2) 获取冗余保护信息证据。由各疑似故障线路两端的主保护、距离保护和方向元件动作信息组成证据融合信息域, 根据其内各保护动作信息, 形成证据组。3) 计算各证据 BPA 值。通过 3.3 节的方法计算各证据的 BPA 值。4) 计算各证据间冲突程度。通过 2.1 节的奇异值方法计算各证据之间的冲突程度  $V_{ij}$ , 当  $V_{ij} \leq 0.5$  且任一证据分配给某一命题 BPA 不为 0 时, 直接采用式(2)进行证据融合, 当  $V_{ij} \geq 0.5$  或任一证据分配给某一命题 BPA 为 0 时, 采用改进证据理论进行融合。5) 识别故障线路。根据证据融合后的结果, 若  $m(L_i) > 0.5$ , 则判断线路  $L_i$  故障; 若  $m(L_i) < 0.5$ , 则判断线路  $L_i$  未故障。

### 3.5 母线后备保护方案

为了提高母线故障判别的可靠性, 本文采用冗余信息实现母线后备保护算法。母线后备保护原理动作逻辑如图 4 所示。由图 4 中母线后备保护原理动作逻辑可以看出, 在母线差动保护失效后, 后备保护系统可以根据该母线关联的方向元件进行方向比较实现故障判别, 还可以根据与母线相连的所有线路对侧距离保护 II 段的动作情况来识别故障, 但

该判据须加延时  $t$  后出口动作, 以排除该母线所连线路和变压器故障。

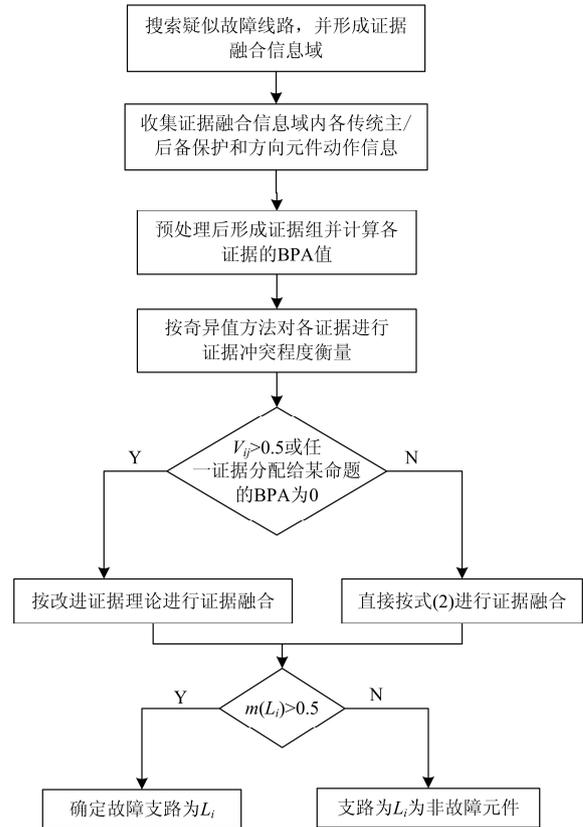


图 3 算法流程图

Fig. 3 Algorithm flowchart

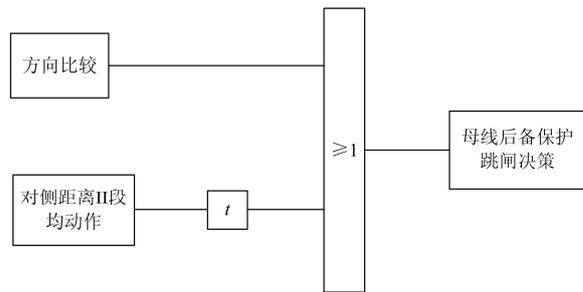


图 4 母线后备保护动作逻辑

Fig. 4 Action logic of bus backup protection

## 4 算例分析

本文采用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建 IEEE5 机 14 节点系统, 对所提算法具有的无需信息同步、站域通信量小和高容错性能进行全面分析和验证, 算法采用 Matlab 编程实现, 如图 5 所示, 其中线路、母线、变压器和变电站分别用  $L$ 、 $B$ 、 $T$  和  $S$  来表示, 各支路两端保护编号用数字表示。

站内传统保护均为双重化配置, 且使用主后备

一体化保护装置。在图 5 中, 以变电站  $S_3$  为例, 与其相邻的变电站为  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_4$ 、 $S_5$ 、 $S_6$  和  $S_7$ , 将故障点设置在变电站  $S_3$  的线路  $L_7$  靠近母线  $B_4$  侧出口处。当线路  $L_7$  故障时, 变电站  $S_3$  的母线  $B_4$ 、 $B_7$  和  $B_9$  所连线路两端主保护、距离保护 I 和 II 段和方向元件比较保护已动作总数量分别为 15 个、0 个和 0 个, 因此将母线  $B_4$  所连线路  $L_7$ 、 $L_3$  和  $L_6$  确定为疑似故障线路, 即识别框架  $\Theta=\{L_7, L_3, L_6\}$ ,  $m(L_7)$ 、 $m(L_3)$  和  $m(L_6)$  分别为相应线路的故障信任度, 将其其他不确定情况  $\Omega=\{\{L_7, L_3\}, \{L_7, L_6\}, \{L_3, L_6\}, \{L_7, L_3, L_6\}\}$  的故障信任度之和归为不确定项故障信任度  $m(\Omega)$ 。此时, 证据融合信息域由线路  $L_7$ 、 $L_3$  和  $L_6$  两端的主保护、距离保护和方向元件动作信息组成。相间距离 I 段和接地距离 I 段动作时,  $P_{L_1}$  分别取值为 0.8 和 0.7, 通常取  $P_{L_2}=1.4^{[20]}$ 。

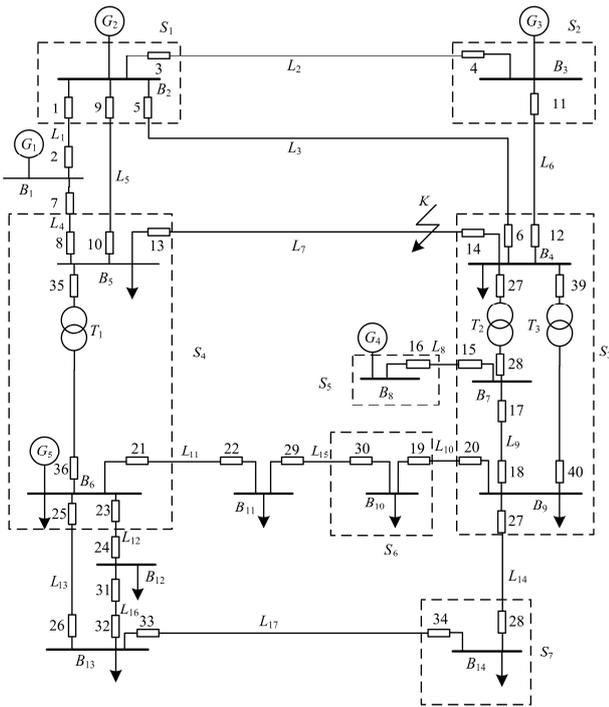


图 5 IEEE5 机 14 节点算例系统

Fig. 5 IEEE5-machine 14-node test system

#### 4.1 站域信息通信和同步性问题分析

站域后备保护装置采用发布方/订阅者通信模式和 GOOSE 报文传输机制与其他保护装置进行数据通信。装置正常情况每隔  $T_0$  ( $T_0=5$  s) 时间发送一次当前状态, 此时报文称为心跳报文, 当 GOOSE 数据集成员数据值发生变化时(即主后备保护或方向元件状态变位), 装置立即发送该数据集所有数据, 然后间隔  $T_1$  发送第二帧和第三帧, 间隔  $T_2$  发送第

四帧, 间隔  $T_3$  发送第五帧, 后续报文发送时间间隔逐渐增加直至恢复心跳报文。以识别变电站  $S_3$  的线路  $L_7$  故障为例, 站域后备保护装置需要搜集变电站  $S_3$  各线路两端的主保护、距离保护和方向元件的动作信息, 由于各动作信息均为逻辑状态量, 此时站间交互信息量  $(3+2+1) \times 6 \times 2 = 72$  位逻辑状态量。根据站域后备保护装置通信机制和交互信息量可知, 本算法所需站域通信量小, 另外由于所需信息均为状态逻辑量, 因此也不受信息同步的影响。

#### 4.2 算法容错性能分析

变电站  $S_3$  线路  $L_7$  故障时, 测试证据融合信息域内随机产生 1~6 位保护动作信息错误或 1~14 位保护动作信息丢失时的故障识别情况, 以检验本算法的容错性。

##### 1) 保护动作信息错误时算法性能

证据融合信息域内随机产生 1~6 位保护信息错误时, 只记录不同位数保护信息错误时对故障识别影响最严重的结果。故障线路识别结果见表 2。

表 2 保护信息错误时故障识别结果

| 故障信任度       | 1~6 位保护信息错误 |         |         |         |         |         |
|-------------|-------------|---------|---------|---------|---------|---------|
|             | 1           | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       |
| $m(L_7)$    | 0.978 3     | 0.954 9 | 0.909 6 | 0.827 2 | 0.692 6 | 0.509 2 |
| $m(L_3)$    | 0.002 0     | 0.007 6 | 0.022 8 | 0.056 9 | 0.120 4 | 0.213 7 |
| $m(L_6)$    | 0.002 0     | 0.007 6 | 0.022 8 | 0.056 9 | 0.120 4 | 0.213 7 |
| $m(\Omega)$ | 0.025 7     | 0.029 9 | 0.044 8 | 0.059 9 | 0.066 6 | 0.063 4 |

由表 2 可以看出, 当证据融合信息域内产生 1~6 位保护动作信息错误时, 仍有  $m(L_7) > 0.5$ , 即算法可以准确识别故障线路。随着信息错误位数的增多, 实际故障线路  $L_7$  的故障信任度逐渐降低, 当产生 8~9 位保护动作信息错误时, 由于错误证据信息过多, 证据融合结果存在误判的现象。

##### 2) 保护动作信息丢失时算法性能

证据融合信息域内随机产生 1~14 位保护信息丢失时, 只记录不同位数保护信息丢失时对故障识别影响最严重结果, 见表 3。由表 3 可以看出, 当证据融合信息域内丢失 1~14 位保护动作信息时, 算法可以准确识别故障线路。随着信息丢失位数的增多, 实际故障线路  $L_7$  的故障信任度逐渐降低, 非故障线路的故障信任度变化不显著, 不确定项的信任度呈增长趋势, 当丢失信息超过 14 位后, 本算法可能识别不出故障线路, 但此时非故障线路的故障信任度很低, 证据融合结果不会出现误判现象。

表 3 保护信息丢失时故障识别结果

Table 3 Fault identification result when protection loss

| 故障信<br>任度   | 1~14 位保护信息丢失 |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-------------|--------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|             | 1            | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      | 11      | 12      | 13      | 14      |
| $m(L_7)$    | 0.984 5      | 0.978 0 | 0.971 4 | 0.966 4 | 0.964 4 | 0.966 5 | 0.972 3 | 0.980 5 | 0.986 5 | 0.976 5 | 0.948 2 | 0.884 6 | 0.764 8 | 0.577 0 |
| $m(L_3)$    | 0.000 7      | 0.009 0 | 0.001 3 | 0.001 7 | 0.001 8 | 0.001 8 | 0.001 6 | 0.000 5 | 0.000 4 | 0.001 1 | 0.002 9 | 0.006 8 | 0.014 6 | 0.027 2 |
| $m(L_6)$    | 0.000 7      | 0.001 0 | 0.001 3 | 0.001 7 | 0.001 8 | 0.001 8 | 0.001 6 | 0.000 5 | 0.000 4 | 0.000 3 | 0.000 2 | 0.000 1 | 0       | 0       |
| $m(\Omega)$ | 0.014 1      | 0.012 0 | 0.026 0 | 0.030 2 | 0.032 0 | 0.029 9 | 0.025 5 | 0.018 5 | 0.012 7 | 0.022 1 | 0.048 7 | 0.107 6 | 0.220 6 | 0.395 8 |

### 5 结论

针对站域后备保护信息同步性要求高, 容错性低等问题, 提出了一种基于改进证据理论融合的站域后备保护算法, 本方法具有以下特点:

1) 故障发生后, 本算法仅需获取变电站各线路两端的保护动作信息, 涉及站间信息交互通信量小, 且对通信系统的同步性没有要求。

2) 充分考虑证据之间的冲突性和包容性, 引入证据的可信度对证据进行预处理, 有效克服证据理论存在的问题。通过改进证据理论对冗余保护信息进行融合判断, 能够应对信息丢失和错误情况, 具备较高的容错性能。

### 参考文献

[1] 吴国旻, 王庆平, 李刚. 基于数字化变电站的集中式保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(10): 15-19.  
WU Guoyang, WANG Qingping, LI Gang. Study of centralized protection based on digital substation[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(10): 15-19.

[2] BO Z Q, LIN X N, WANG Q P, et al. Developments of power system protection and control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1-8. DOI: 10.1186/s41601-016-0012-2.

[3] 姚旭, 程蓉, 崔力心, 等. 面向智能变电站的输电线路综合故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(11): 40-45.  
YAO Xu, CHENG Rong, CUI Lixin, et al. Study of comprehensive transmission line fault location method for smart substation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(11): 40-45.

[4] 刘洋, 马进, 张籍, 等. 考虑继电保护系统的新一代智能变电站可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(8): 147-154.  
LIU Yang, MA Jin, ZHANG Ji, et al. Reliability evaluation of a new generation smart substation considering relay protection system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(8): 147-154.

[5] 陈桥平, 姚亮, 梁博, 等. 智能变电站不停电改造扩建

方案的应用[J]. 陕西电力, 2016, 44(9): 89-92.  
CHEN Qiaoping, YAO Liang, LIANG Bo, et al. Application of smart substation reform & extension scheme with uninterrupted power bay[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(9): 89-92.

[6] 蔡小玲, 王礼伟, 林传伟, 等. 基于智能变电站的站域保护原理和实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 2012, 24(6): 128-133.  
CAI Xiaoling, WANG Liwei, LIN Chuanwei, et al. Principle and realization of substation-area protection based on smart substation[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2012, 24(6): 128-133.

[7] 张保会, 周良才, 汪成根, 等. 具有容错性能的广域后备保护算法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(5): 66-71.  
ZHANG Baohui, ZHOU Liangcai, WANG Chenggen, et al. Wide area backup protection algorithm with fault-tolerance performance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(5): 66-71.

[8] 张保会, 周良才. 变电站集中式后备保护[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(6): 1-5.  
ZHANG Baohui, ZHOU Liangcai. Centralized substation backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(6): 1-5.

[9] 王媛, 焦彦军. 基于多 Agent 技术的站域保护系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 80-85.  
WANG Yuan, JIAO Yanjun. Research on substation-area protection system based on multi-Agent system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 80-85.

[10] 周泽昕, 王兴国, 杜丁香, 等. 一种基于电流差动保护的变电站后备保护[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 1113-1120.  
ZHOU Zexin, WANG Xingguo, DU Dingxiang, et al. A substation backup protection based on current differential protective principle[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 1113-1120.

[11] 高厚磊, 刘益青, 苏建军, 等. 智能变电站新型站域后备保护研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 32-38.  
GAO Houlei, LIU Yiqing, SU Jianjun, et al. New type of

- substation-area backup protection for intelligent substation[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 32-38.
- [12] 李倍, 和敬涵, TONY Yip. 一种基于相位相关电流差动的站域后备保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(24): 1-5.  
LI Bei, HE Jinghan, TONY Yip. A study of substation-area backup protection based on phase related current differential[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(24): 1-5.
- [13] 马静, 史宇欣, 马伟, 等. 基于电流保护融信因子的站域后备保护[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(4): 1-9.  
MA Jing, SHI Yuxin, MA Wei, et al. Substation backup protection based on current fusion reliable factor[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(4): 1-9.
- [14] 孔德洪, 吕飞鹏. 基于区域多信息融合的广域后备保护算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(4): 26-32.  
KONG Dehong, LÜ Feipeng. An algorithm of wide area protection based on regional multi information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(4): 26-32.
- [15] 王志强, 吴庆, 张拯, 等. 基于异常分析的电力信息通信系统运维策略[J]. 陕西电力, 2016, 44(4): 84-87.  
WANG Zhiqiang, WU Qing, ZHANG Zheng, et al. Maintenance strategy of power grid information and telecommunication system based on abnormal analysis[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(4): 84-87.
- [16] 孔令号, 焦彦军, 戴志辉. 基于灰色关联度的站域保护原理[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2274-2279.  
KONG Linghao, JIAO Yanjun, DAI Zhihui. A new substation area protection principle based on gray correlation degree[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2274-2279.
- [17] 陈毅波, 郑玲, 姚建刚. 基于粗糙集理论与 D-S 证据理论改进的多元回归负荷预测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 62-67.  
CHEN Yibo, ZHENG Ling, YAO Jiangang. Improved multiple regression load forecasting method based on rough set theory and D-S evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 62-67.
- [18] 柯小路. 证据理论中信任函数的合成方法[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2016.
- [19] 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.
- [20] 陈国炎. 广域后备保护原理与通信技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.  
CHEN Guoyan. Study of wide-area back-up protection principle and its communication technology[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.

收稿日期: 2017-06-14; 修回日期: 2017-08-07

作者简介:

蒋红亮(1992—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护; E-mail: 825416657@qq.com

吕飞鹏(1968—), 男, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统继电保护和故障信息智能处理系统等。

(编辑 周金梅)