

基于多源信息融合的变电站拉路辅助决策系统

左雷鹏¹,孙佳伟¹,赵 飞^{2,3},葛景璞¹,郁寅锋³

(1.国网河北省电力有限公司保定供电分公司,河北 保定 071051;2.华北电力大学电力工程系,河北 保定 071003;
3.保定市炜达电力设备有限责任公司,河北 保定 071025)

摘要:针对小电流接地系统单相接地故障处置中传统拉路法因信息维度单一导致盲目拉路问题,提出一种基于多源信息融合的变电站拉路辅助决策系统,该系统通过构建站内-站外故障信息联合决策机制,利用通信模块自动采集并解析站外馈线各终端上报的告警信息,基于独立通路原理的故障概率计算模型与自适应动态权重算法计算站外馈线的故障概率,将D-S证据理论应用于站内-站外多源信息融合算法,采用Dempster组合规则生成联合信任度,提供故障信任度概率排序决策。经实际案例验证,该系统可有效提高故障拉路准确性,避免盲目试拉造成的非故障馈线误切,具有容错性强、部署简单的特点,为提升变电站拉路处置效率提供新技术路径。

关键词:小电流接地系统;拉路;D-S证据理论;辅助决策系统

中图分类号:TM734 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-9898(2026)01-0034-07

Multi-source Information Fusion-based Decision Support System for Substation Switching Operations

ZUO Leipeng¹,SUN Jiawei¹,ZHAO Fei^{2,3},GE Jingpu¹,YU Yin Feng³

(1.State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd. Baoding Power Supply Branch,Baoding 071051,China;
2.Department of Power Engineering,North China Electric Power University,Baoding 071003,China;
3.Baoding Weida Electric Power Equipment Co., Ltd.,Baoding 071025,China)

Abstract:To address the issue of blind switching operations caused by single-dimensional information in traditional switching methods for single-phase grounding fault disposal in small-current grounding systems,this paper proposes a multi-source information fusion-based decision support system for substation switching operations.The system establishes an joint decision-making mechanism for intra-substation and extra-substation fault information.Through communication modules,it automatically collects and parses alarm information reported by each terminal of external feeders.A fault probability calculation model based on the independent pathway principle and an adaptive dynamic weighting algorithm are developed to compute fault probabilities of external feeders.The Dempster-Shafer (D-S) evidence theory is applied to the multi-source information fusion algorithm for intra-and extra-substation sources,and the Dempster combination rule is adopted to generate joint belief degrees,providing decision support for fault confidence probability ranking.Practical case tests demonstrate that the system significantly improves switching accuracy,avoids mis-switching of non-faulty feeders caused by random trial switching,and exhibits strong fault tolerance with simple deployment.This work provides a novel technical pathway to enhance substation switching operation efficiency.

Key words:small-current grounding system;switching operations;D-S evidence theory;decision support system

0 引言

近年来,国家提出了碳达峰、碳中和战略目标,实施可再生能源替代行动,构建清洁低碳化新型电力系统。分布式电源、分布式储能与新型负

荷的大量接入使得配电网出现供电多元化,因此对配电网的安全性提出了更高的要求。

我国配电网以小电流接地系统为主,单相接地故障作为该系统最常见故障类型,当前,变电站针对单相接地故障的处理仍广泛依赖拉路法这一

收稿日期:2025-03-30 修回日期:2025-05-16

作者简介:左雷鹏(1988—),男,副高级工程师,主要从事智能配电网、新型电力系统研究与电气试验、变电检修相关方面的工作。

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目(kj2024-088)。

传统手段^[1-5],即通过逐条断开线路并观察零序电压变化来定位故障线路。然而,该方法存在局限性:拉路操作需人工干预,耗时较长,频繁拉合闸操作易造成非故障线路短时停电,扩大停电范围,降低供电可靠性并引发用户投诉。近年来,电力系统调度员不断优化拉路的规则^[6-8]。文献[6]提出通过遥控分闸后自动合闸或重合闸方式实施程序化试拉流程,虽显著提升了操作效率,但仍存在依赖经验试拉并未定向故障原因的局限。文献[7]采用基于 SCADA 系统采集判断零序电流大小方法进行故障选线拉路,本质上与站内小电流接地选线装置原理一致,高阻接地故障时,特征电流极小而导致方法失败。文献[8]采用基于历史数据的方法,依据历史故障线路制定拉路优先顺序,但历史故障与新故障之间不存在必然的关联关系。近年来,随着配电自动化系统的不断建立,以多源信息为基础的单相接地故障系统建立^[9-12]。文献[9]提出基于融合信息进行故障拉路,仍然以常规的遥测量为依据。文献[10]提出建立单相接地故障信息监管系统,将变电站内的消弧线圈控制器、接地选线装置等信息进行监测管理、分析应用,忽略站外配电终端的故障信息状态。文献[11]提出不断提高分段开关自动化率,加快小电流接地选线装置升级改造以及基于线路状态评价的方式制定拉路顺序表。文献[12]提出的基于配电自动化系统开发单相接地故障辅助研判模块,通过故障大数据分析识别故障,该方法通过全局录波数据进行分析,系统庞杂、算法复杂,效果有待验证。为提升单相接地故障处置效率,国家电网有限公司自 2021 年起逐步推广应用集成一二次融合技术的柱上断路器及环网柜^[13-14],其设计目标包含单相接地故障就地处置功能。然而,实际运行中暴露出设备误报率、漏报率偏高,配电自动化系统与调度系统间协同决策机制不足等问题^[15-18],变电站拉路仍以调度员经验为主。

基于上述问题,本文研究提出一种变电站拉路辅助决策系统,其构建站内-站外协同决策框架,通过云端决策平台融合两类异构数据源,站外配电终端的多维状态信息与站内馈线就地故障诊断模块的实时监测数据。Dempster-shafer(D-S)证据理论是一种处理不确定性和不完整信息的数学工具,近年来广泛应用于信息融合、决策分析、

模式识别等领域^[19-20]。本文基于独立通路原理建立馈线故障概率模型和自适应动态权重算法,通过站外信息量化各馈线故障发生概率,进一步将站内-站外证据实现多源信息融合,采用 Dempster 组合规则计算联合信任度,生成基于信任度概率排序的拉路辅助决策结果,经实际案例验证表明,与现有方法相比,本系统具有容错性强、算法简单、易部署的特点,可有效提升变电站拉路决策精度。

1 拉路辅助决策系统功能及组成

1.1 系统功能

配电网发生单相接地故障时,变电站拉路辅助决策系统需实现多源信息融合与智能决策功能,该系统通过以下流程实现精准决策。

1)异构数据采集:站外接收配电终端(如馈线终端单元/故障指示器等,简称“终端”)上报告警信息短信,站内基于分布式部署的馈线就地故障诊断单元获取各馈线的站内诊断信息结果。

2)多源信息融合:在云端决策平台中,汇集站外故障信息集合与站内故障信息集合。

3) 概率决策输出:应用概率计算模型计算站外故障概率,结合站内故障集合,基于 D-S 证据理论生成信任度排序,为调度员提供量化决策。

1.2 系统组成

本文构建的拉路辅助决策系统如图 1 所示, 其包含 4 个核心组件。

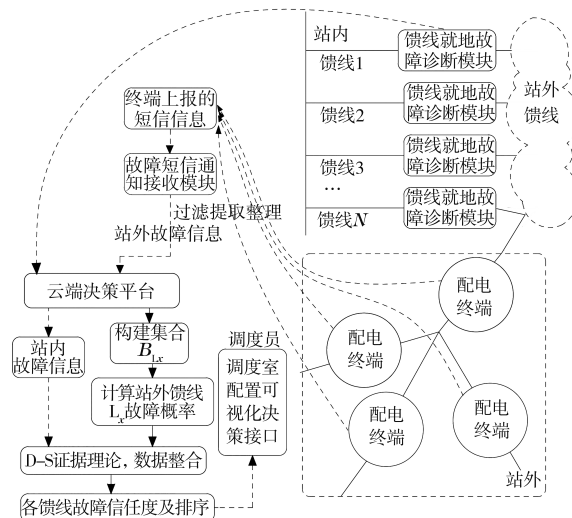


图 1 系统组成及信息流向

1) 站外故障短信通知接收模块

负责接收站外终端上报的各种告警信息, 经过滤提取整理后, 将终端上报的告警信息(整理为含位置标签的告警信息)发送至云端决策平台。

2) 站内馈线就地故障诊断单元

部署于站内各馈线间隔并实施变电站馈线首端自我诊断, 当检测到馈线发生单相接地故障时, 将该馈线对应站内诊断信息(简称“站内馈线 L_x 诊断信息”)发送至云端决策平台。

3) 云端决策平台

完成站内与站外多源信息融合与概率计算; 云端将站外告警信息以馈线 L_x 为信息集合单元构建站外馈线 L_x 故障集合 B_{L_x} (简称“集合 B_{L_x} ”), 依据站外馈线拓扑图和概率计算模型, 计算出站外馈线 L_x 故障概率, 将其结果与站内馈线 L_x 诊断信息基于 D-S 证据理论实现站内-站外数据的自适应融合, 最终计算出各馈线故障信任度及排序, 并将结果推送给可视化决策接口。

4) 调度室配置可视化决策接口

输出各馈线故障信任度排序结果, 为调度员提供可视化辅助决策。各模块之间通过无线通信接口实现数据交互, 其架构采用分层设计模式确保实时性与可靠性。

2 站内-站外多源信息融合算法

2.1 站外馈线拓扑图独立通路及层级定义

单相接地故障发生后, 在“集合 B_{L_x} ”中, 因终端存在误报、漏报等错误情况, 需建立容错性故障概率计算模型, 为合理评估计算站外馈线 L_x 故障概率, 本文对站外馈线 L_x 拓扑图定义故障路径独立通路概念及层级概念。

独立通路的定义: 站外馈线拓扑图中, 根据放射性拓扑图, 标识在同一条放射线上, 最远端上报告警信息的终端与馈线首端终端(1 号终端)则属于 1 个独立通路; 两个不同的最远端上报告警信息的终端不在馈线首端终端(1 号终端)同一条放射线上的则属于不同的独立通路。按此定义, 统计站外馈线 L_x 拓扑图中集合 B_{L_x} 中存在的独立通路数。

独立通路的总层级数和对应各层级定义: 在 1 个独立通路上, 从第一个终端(1 号终端)开始, 沿着独立通路上包含的各终端, 直至最后一个上报

告警信息的终端共计含有的终端总数即为总层级数(假设为 m); 从放射性拓扑图首端第 1 个终端(1 号终端)为第 1 层级, 第 2 个终端为第 2 层级, 以此类推, 最后 1 个终端为第 m 层级。

不同情况下独立通路(均包含 6 个终端)示意如图 2 所示。

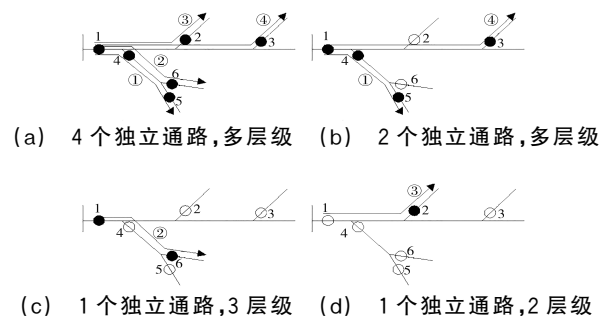


图 2 不同情况下独立通路示意

图 2(a)中, 共有 4 个独立通路, 依次为: 由终端 1、终端 4、终端 5 构成的独立通路①, 含有 3 个层级; 由终端 1、终端 4、终端 6 构成的独立通路②, 含有 3 个层级; 由终端 1、终端 2 构成的独立通路③, 含有 2 个层级; 由终端 1、终端 3 构成的独立通路④, 含有 2 个层级。

图 2(b)中, 共有 2 个独立通路数, 依次为: 由终端 1、终端 4、终端 5 构成的独立通路①, 含有 3 个层级; 由终端 1、终端 3 构成的独立通路④, 含有 2 个层级。

图 2(c)中, 共有 1 个独立通路数, 由终端 1、终端 4、终端 6 构成的独立通路②, 含有 3 个层级。

图 2(d)中, 共有 1 个独立通路数, 由终端 1、终端 2 构成的独立通路③, 含有 2 个层级。

2.2 站外馈线故障概率计算模型及算法

2.2.1 基于独立通路原理的故障概率计算模型

站外馈线 L_x 故障概率计算公式为:

$$\begin{cases} F(B_{L_x}) = \bigcup_{i=1}^N \max(P_{ji} \times a_{ji}), a_{ji} \in B_{L_x} \\ \sum_{j=1}^{m_i} P_{ji} = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: N 为集合 B_{L_x} 中统计的独立通路数; m_i 为第 i 个独立通路上总层级数; P_{ji} 为第 i 个独立通路中第 j 层级上终端对应权重系数; a_{ji} 为第 i 个独立通路中第 j 层级上终端是否收到上报的告警信息, 收到告警信息取 1, 未收到告警信息取 0。

1) 最大故障概率原理

式(1)通过分别计算每个独立通路上的故障概率,在可能存在的多个独立通路中,选取独立通路概率计算值中的最大值(即最大故障概率原理)作为最终站外馈线 L_x 概率计算结果,以获取最有效(少误报和漏报)的独立通路作为故障判断主因,并将最大故障概率所在的独立通路标记为故障路径,为拉路后接地故障查找路径提供明确运维信息。

2) 冲突处置优化策略

当多个独立通路上故障概率计算结果相等或接近时,表明站外馈线 L_x 不同的独立通路上有终端存在误报或漏报情况,此时仍选择独立通路概率计算值中的最大值(最大故障概率原理)作为本次最终站外馈线 L_x 概率计算值。同时基于自适应动态权重算法,在下次新计算中不断降低该误报漏报独立通路概率计算值,实现冲突处置不断优化调整。

2.2.2 自适应动态权重算法

1) P_{ji} 初始权重系数设置原理因初始状态可认为各终端均具有相同的故障研判准确性能, P_{ji} 的初始状态可按平均分配原则设置, P_{ji} 初始权重系数计算公式为

$$P_{ji} = \frac{1}{m_i} \quad (2)$$

2) P_{ji} 动态更新权重系数的计算:计算的工作原理为按一定时间段(如每月)定期考核站外各终端实际累计正确动作(未误报和漏报)次数,将各终端的统计结果更新导入本系统,实现 P_{ji} 的动态更新,在下次故障计算概率时,将历史准确告警的终端对应层级的权重增加,将历史误报、漏报的终端对应层级的权重降低,具体实施如下。

a. 每次故障实际运维确认故障路径后,对故障路径上的某终端,更新统计 N_1 ,如果该终端上报告警信息(即未误报和漏报),更新统计 m_1 ,以此计算该终端故障处置正确动作率,计算公式为

$$\beta_1 = \frac{m_1}{N_1} \quad (3)$$

式中: N_1 为某终端下方发生故障次数; m_1 为某终端对应上报告警信息次数。

b. 每次故障实际运维确认非故障路径后,对于非故障路径上的某终端,更新统计 N_2 ,如果该终端不上报告警信息(即未误报),更新统计 m_2 ,以此计

算该终端非故障处置正确动作率,计算公式为

$$\beta_2 = \frac{m_2}{N_2} \quad (4)$$

式中: N_2 为某终端下方未发生故障次数; m_2 为某终端在下方未发生故障时对应不上报告警信息次数。

c. 基于某终端计算出的 β_1 和 β_2 ,计算其综合正确动作率,计算公式为

$$\alpha = \frac{\beta_1 + \beta_2}{2} \quad (5)$$

式中: α 为客观评估某终端实际动作准确性。

d. 动态更新权重系数计算公式为

$$P_{ji_update} = \frac{\alpha_{ji}}{\sum_{j=1}^{j=m_i} \alpha_{ji}} \quad (6)$$

式中: α_{ji} 为经式(5)重新计算的第 i 个独立通路中第 j 层级上对应终端的综合正确动作率。

e. 自适应动态权重算法下站外馈线 L_x 故障概率计算公式为

$$F'(B_{Lx}) = \bigcup_{i=1}^{i=N} \max(P_{ji_update} \times a_{ji}), a_{ji} \in B_{Lx} \quad (7)$$

式中: P_{ji_update} 为第 i 个独立通路上第 j 层级上终端对应的动态更新权重系数。

2.3 站内-站外多源信息融合算法

本文基于 D-S 证据理论实现站内-站外数据的自适应融合,通过 Dempster 组合规则将站内-站外的独立证据生成联合信任度函数,实现故障信任度概率排序。

2.3.1 基本概率赋值函数(basic probability assignment, BPA)的构建

设辨识框架 $\Theta = \{F_1, F_2, \dots, F_n, \dots, F_N\}$, 共计 N 条馈线,其中 F_n 表示第 n 条馈线发生故障的命题,需为每个证据源(站内、站外)定义其 BPA 函数。

1) 站内证据 BPA(m_1)计算方法

基于当前馈线站内诊断信息以及馈线就地故障诊断单元历史正确动作率进行综合计算,计算公式为

$$\begin{cases} m_1(F_i) = \frac{\lambda_{F_i}}{\sum_{F_i \in 1} \lambda_{F_i} + \sum_{F_j \in 0} (1 - \lambda_{F_j})}, F_i = 1 \\ m_1(F_j) = \frac{1 - \lambda_{F_j}}{\sum_{F_i \in 1} \lambda_{F_i} + \sum_{F_j \in 0} (1 - \lambda_{F_j})}, F_j = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: F_i 、 F_j 分别为站内第 i 条和第 j 条馈线上报的站内诊断信息结果, 诊断为故障状态取值为 1, 诊断为非故障状态取值为 0; λ_{Fi} 为站内第 i 条馈线部署的馈线就地故障诊断单元历史正确动作率; λ_{Fj} 为站内第 j 条馈线部署的馈线就地故障诊断单元历史正确动作率。

2) 站外证据 BPA(m_2) 计算方法

通过计算出的站外各馈线故障概率, 计算站外各证据, 计算公式为

$$m_2(F_x) = \frac{F(B_{Lx})}{\sum_{x=1}^N F(B_{Lx})} \quad (9)$$

式中: $F(B_{Lx})$ 为经式(7)计算的站外馈线 L_x 故障概率。

2.3.2 Dempster 组合规则计算

通过 Dempster 组合规则, 对站内、站外独立证据源 m_1 和 m_2 进行融合, 得到联合 BPA(m_{12})。

1) 证据冲突系数计算, 计算公式为

$$K = \sum_{F_i \cap F_j = \emptyset} m_1(F_i) \cdot m_2(F_j) \quad (10)$$

式中: K 为证据间的冲突程度, $K \in [0, 1]$ 。

2) 联合 BPA 合成, 计算公式为

$$m_{12}(F_n) = \frac{\sum_{F_i \cap F_j = F_n} m_1(F_i) \cdot m_2(F_j)}{1 - K} \quad (11)$$

式中: 分子为所有支持 F_n 证据的乘积组合; 分母为归一化因子, 消除冲突影响。

3) 信任函数计算, 计算公式为

$$f_{\text{Bel}}(F_n) = \sum_{A \subseteq F_n} m_{12}(A) \quad (12)$$

信任函数 $f_{\text{Bel}}(F_n)$ 表示对命题 F_n 的信任度, 依据计算出的 $f_{\text{Bel}}(F_n)$ 大小, 实现变电站内各条馈线故障信任度排序, 提供拉路决策依据。

3 实例验证和对比分析

3.1 站外馈线故障概率计算模型案例验证

本研究基于保定某 35 kV 变电站 10 kV 馈线实际故障案例, 如图 3 所示。在站外馈线 L_1 的终端 8 下方发生单相接地故障, 开展站外馈线 L_1 故障概率计算与分析, 以验证所提概率计算模型的正确性及自适应动态权重算法的工程适用性。

故障发生后, 站外馈线 L_1 上的终端 5 误报, 终端 6 漏报, 终端 1 和终端 8 正确报警。

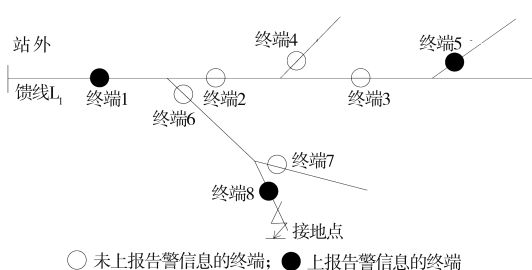


图 3 馈线 L_1 拓扑及终端报警示意

根据站外馈线 L_1 终端上报信息的结果, 集合 B_{L1} 中含有 2 个独立通路, 分别为: 由终端 1、终端 6、终端 8 构成的独立通路 1 和由终端 1、终端 2、终端 3、终端 5 构成的独立通路 2。

1) 以初始权重计算站外馈线 L_1 故障概率

按平均分配原则为独立通路中各终端分配相应的初始权重系数 P_{ij} , 以确定初始状态。

独立通路 1: $m_1 = 3$, $P_{11} = P_{21} = P_{31} = 1/3 = 33.3\%$;

独立通路 2: $m_2 = 4$, $P_{12} = P_{22} = P_{32} = P_{42} = 1/4 = 25\%$ 。

通过式(1)计算的站外馈线 L_1 故障概率。

$$\begin{aligned} F(B_{L1}) &= \bigcup_{i=1}^2 \max(P_{ji} \times a_{ji}) \\ &= \max\{(33.3\% \times 1 + 33.3\% \times 0 + 33.3\% \times 1), \\ &\quad (25\% \times 1 + 25\% \times 0 + 25\% \times 0 + 25\% \times 1)\} \\ &= \max(66.6\%, 50\%) = 66.6\% \end{aligned}$$

2) 经优化后重新计算站外馈线 L_1 故障概率

本文依据配电运检部门提供的 1 个月馈线 L_1 上安装的各终端实际接地告警统计信息, 通过式(3)~(5), 计算各终端综合正确动作率, 终端 1: 90%, 终端 6: 40%, 终端 8: 90%, 终端 2: 90%, 终端 3: 90%, 终端 5: 60%。

通过式(6)计算独立通路 1、独立通路 2 上各终端对应层级的动态更新权重系数, 计算结果如表 1、表 2 所示。

表 1 独立通路 1 动态更新权重系数计算结果 单位: %

动态更新权重系数	P_{11}	P_{21}	P_{31}
计算值	40.9	18.2	40.9

表 2 独立通路 2 动态更新权重系数计算结果 单位: %

动态更新权重系数	P_{12}	P_{22}	P_{32}	P_{42}
计算值	27.3	27.3	27.3	18.2

采用表 1 和表 2 计算出的动态更新权重系数, 通过式(7)重新计算站外馈线 L_1 故障概率。

$$F'(B_{L1}) = \bigcup_{i=1}^{i=2} \max(P_{ji_update} \times a_{ji}) = \max\{(40.9\% \times 1 + 18.2\% \times 0 + 40.9\% \times 1), (27.3\% \times 1 + 27.3\% \times 0 + 27.3\% \times 0 + 18.2\% \times 1)\} = \max(81.8\%, 45.5\%) = 81.8\%$$

经实际案例分析计算,验证了所提概率计算模型可有效量化站外该馈线故障发生概率,并通过引入自适应权重优化算法,模型计算值由初始权重(未考虑终端差异性)条件下的 66.6% 提升至经终端运行数据统计校准后的 81.8%,故障路径更准确。

3.2 站内-站外自适应融合算法案例验证

将本文提出的站内-站外自适应融合算法应用于保定某 35 kV 变电站 10 kV 馈线拉路辅助决策,该站共有 5 条 10 kV 馈线,每条馈线首端安装有馈线就地故障诊断单元各 1 台,用于站内馈线就地故障告警;安装有故障短信通知接收模块 1 台,用于接收该站所属馈线上各终端上报的告警信息短信。

故障案例为站外馈线 L_1 的终端 8 下方发生单相接地故障(图 3 所示故障案例),该 35 kV 变电站部署的云端决策平台自适应融合算法实施流程如下。

1) 获取站内、站外装置/终端告警信息

站内装置:站内馈线 L_1 、 L_5 上报告警信息,说明站内诊断信息存在误报现象。

站外终端:站外馈线 L_1 、 L_2 、 L_4 、 L_5 均有终端上报告警短信,说明站外终端存在误报现象。

2) 站内证据 BPA(m_1)计算

预设馈线就地故障诊断单元历史正确动作率均为 90%,将站内诊断信息结果通过式(8)计算站内证据,计算值如表 3 所示。

表 3 站内证据 BPA 计算值

证据源	$m_1(F_1)$	$m_1(F_2)$	$m_1(F_3)$	$m_1(F_4)$	$m_1(F_5)$
计算值	0.429	0.048	0.048	0.048	0.429

3) 站外证据 BPA(m_2)计算

通过故障短信通知接收模块,接收全部站外各终端上报的告警信息,以馈线号为单位建立故障集合,通过式(7)分别计算出站外馈线 L_1 — L_5 故障概率,计算值如表 4 所示。

表 4 站外各馈线故障概率计算值 单位:%

故障概率	$F(B_{L1})$	$F(B_{L2})$	$F(B_{L3})$	$F(B_{L4})$	$F(B_{L5})$
计算值	81.8	25	0	12	25

将表 4 计算结果通过式(9)计算站外证据,计算值如表 5 所示。

表 5 站外证据 BPA 计算值

证据源	$m_2(F_1)$	$m_2(F_2)$	$m_2(F_3)$	$m_2(F_4)$	$m_2(F_5)$
计算值	0.569	0.174	0	0.083	0.174

4) 证据冲突系数计算

通过式(10)计算过程如下

$$K = m_1(F_1) \cdot m_2(F_2) + m_1(F_1) \cdot m_2(F_3) + \dots m_1(F_5) \cdot m_2(F_4) = 0.429 \times 0.174 + 0.429 \times 0 + \dots 0.429 \times 0.083 = 0.671$$

5) 联合 BPA 计算

通过式(11)计算联合 BPA,如表 6 所示。

表 6 联合 BPA 计算值

证据源	$m_{12}(F_1)$	$m_{12}(F_2)$	$m_{12}(F_3)$	$m_{12}(F_4)$	$m_{12}(F_5)$
计算值	0.742	0.025	0	0.012	0.227

6) 变电站各馈线故障信任度计算及排序

通过式(12),计算结果如下

$$f_{\text{Bel}}(F_1) = 0.742, f_{\text{Bel}}(F_2) = 0.025, f_{\text{Bel}}(F_3) = 0, f_{\text{Bel}}(F_4) = 0.012, f_{\text{Bel}}(F_5) = 0.227, \text{按 } f_{\text{Bel}}(F_n) \text{ 降序排列: } f_{\text{Bel}}(F_1) > f_{\text{Bel}}(F_5) > f_{\text{Bel}}(F_2) > f_{\text{Bel}}(F_4) > f_{\text{Bel}}(F_3)$$

依据排序高低,判定馈线 L_1 为故障馈线,调度员执行馈线 L_1 拉路,1 次操作切除故障,运维提示故障路径为站外馈线 L_1 的终端 1、终端 6、终端 8。

3.3 对比分析

3.3.1 与传统方法对比分析

为验证所提方法的有效性,与传统方法进行故障案例处置效率评估,重点分析试拉次数、处置时间、操作依据等核心指标对比,如表 7 所示。

表 7 不同方法故障处置效率对比

方法	试拉次数 /次	处置时间 /min	操作依据
本文方法	1	<3	L_1 故障信任度最高
站内选线法	1~2	15	站内 L_1 、 L_5 上报告警,试拉
站外终端法	1~4	30	站外 L_1 、 L_2 、 L_4 、 L_5 均有终端上报告警,试拉
顺序拉路法	1~5	30	按拉路序位表或经验试拉

根据对比分析结果,在站内与站外监测设备、终端存在误报及漏报复合干扰的复杂场景下,本文所提方法相较于传统方法展现出显著优势:试拉操作次数由不确定多次优化至明确 1 次,故障切除时间从 15~30 min 的不确定性时间范围缩

短至 3 min 以内。该方法有效避免了因非故障馈线的误切除引发的短时供电中断,优势为 1)试拉次数显著降低;2)操作时效性明确提升;3)供电可靠性有效保障。

3.3.2 与现有融合方法对比分析

将本文方法与文献[9-12]提出的现有融合方法进行对比分析,如表 8 所示。

表 8 不同融合方法对比表

方法	融合数据源	技术特点
本文方法	站内各馈线诊断装置与站外各终端信息融合	算法模型简单,信息量全,利用故障后各终端轻量级数据(站内站外信息综合决策)
文献[9]	站内选线装置数据与站内开关拉路序列信息融合	选线结果与拉路经验结合(仅站内信息决策)
文献[10]	站内选线装置、站内遥测数据、站内消弧线圈信息融合	站内各装置与遥测数据结合(仅站内信息决策)
文献[11]	主网 SCADA 系统遥测数据母线拉路、站内选线装置跳闸信息融合	主站选线、经验拉路和选线跳闸功能结合(仅站内信息决策)
文献[12]	配电自动化系统数据	模型算法复杂,需大数据训练,投资成本较大,维护量大

通过对比分析可知,本文所提方法因融合站内站外信息,较现有融合方法具有采集信息方法简单、模型算法小型化、系统轻量化、易部署的显著优势,因有效利用站外各类终端丰富的信息价值,可为当前故障拉路辅助决策提供新的技术路径。

4 结论

本研究提出一种基于多源信息协同的变电站拉路辅助决策系统,首先,结合独立通路原理与自适应动态权重算法,构建站外馈线故障概率量化模型;其次,运用 D-S 证据理论实现站内外多源信息的协同融合,最后,基于生成的馈线故障信任度排序,提供数字化决策建议。实证结果表明,相较于现有方法,该系统可显著降低试拉频次,提高调度员故障处置效率。

下一步拟将综合自动化系统的遥测数据和小电流接地选线装置的选线数据也纳入站内-站外多源信息融合决策机制,同时增加基于 AI 的自学习模型,进一步提升拉路辅助决策系统的准确性,

为故障拉路智能化处置提供更高效解决方案。

参考文献:

[1] 林 亮,刘冲冲,王小祥,等.变电站内设备小电流接地的分析及处理[J].电工技术,2024(10):208-210,214.

[2] 夏 欢.不接地系统母线单相接地故障的智能研判[J].中国仪器仪表,2024(11):93-95.

[3] 耿 晋,候智圆,王 耀,等.减少配网接地后故障隔离复电时间[J].农村电气化,2023(3):77-80.

[4] 周耀辉,李 永,梁学良,等.基于调度自动化系统的单相接地故障研判功能研究与实现[J].电子设计工程,2015,23(19):159-161,164.

[5] 李 根.小电流接地系统单相接地故障处理技术研究[J].企业科技与发展,2022(10):81-83.

[6] 陈国华.改进的遥控拉路选线法[J].电工技术,2014(9):62-63.

[7] 朱 涛.基于 SCADA 系统的小电流接地故障选线方法研究[J].电力系统保护与控制,2019,47(13):141-147.

[8] 周福举.基于历史数据的配电网单相接地选线方法[J].农村电工,2020,28(3):36-37.

[9] 单喜斌,麻亚鹏,宋宗勋,等.基于多源信息融合的配电网小电流接地选线方法[J].自动化技术与应用,2019,38(4):102-106,122.

[10] 陈宜凯,刘 健,张小庆,等.配电网单相接地信息监管系统[J].供用电,2022,39(3):40-45.

[11] 江 南,尚 超,张明君.提升配网单相接地调控处置效率的探讨与实践[J].电工技术,2021(4):43-45.

[12] 钟 睿,朱子睿.基于配电自动化系统的配电网单相接地故障辅助研判模块开发及应用[J].光源与照明,2024(9):74-76.

[13] 李 辉,田 野,陈江波,等.一二次融合成套断路器单相接地故障处置真型试验技术研究[J].电力系统保护与控制,2021,49(12):158-165.

[14] 闫强强.基于一二次融合开关的小电流接地故障保护应用[J].电力安全技术,2025,27(1):30-34.

[15] 周 刚.深化配网“一二次融合”推进智能化体系建设[J].中国电力企业管理,2022(28):82-83.

[16] 杜 鹏,李 朋,王 伟,等.电网接地故障快速处置的调控系统实践[J].河北能源职业技术学院学报,2025,25(2):65-67.

[17] 魏榆扬,向 泽,董 恒,等.配电终端的小电流接地故障研判失败案例分析[J].电工技术,2025(17):140-143.

[18] 牛 欢,夏天宇,张 振,等.配电网调度视角下的单相接地故障高效处置策略[J].电工技术,2025(1):99-100,104.

[19] 刘高高,黄东杰,席 昕,等.一种特征融合的工作模式识别方法[J].西安电子科技大学学报,2023,50(6):13-20.

[20] 李刚毅.基于多传感信息融合的开关柜局放类型诊断研究[J].电器与能效管理技术,2025(1):23-27.

本文责任编辑:王洪娟