省级配电自动化主站的停电信息资源池功能设计

冷 华[1]，钱玉麟[2]，朱吉然[3]，唐海国[3]，张伟伟[2]，张海文[4]
（1. 湖南大学电气与信息工程学院，湖南省长沙市 410082；
2. 南瑞集团有限公司（国网电力科学研究院有限公司），江苏省南京市 211000；
3. 国网湖南省电力有限公司电力科学研究院，湖南省长沙市 410000；
4. 国网湖南省电力公司永州供电分公司，湖南省永州市 425000）

摘要：各地配网自动化建设尚处于大规模试点阶段，很多区域的故障信息感知和定位手段有限，不同性质的停电事件信息又来源于多个业务系统，在条件有限的情况下实现停电事件精准分析的需求尤为迫切。文中结合电力公司的停电管理实际业务流程，设计停电信息资源池功能，综合分析变电站、馈线、台区、用户多层主配网数据，在分层分级研判基础上建立信号可信度模型，结合DS证据理论算法融合分析，多维度灵活地挖掘分析停电事件，提高故障点定位的容错性，满足在差异化场景下构建可靠的结构化停电信息资源池实现数据的共享发布。

关键词：停电分析；配电自动化；大数据；故障定位；DS证据理论；

0 引言

截至目前，中国大部分地区的配电网终端设备覆盖有限，很多线路尚未进行自动化改造，同一地域的配电自动化建设也会根据经济水平进行差别化投资，这导致很多停电事件的故障定位还需要结合业务人员的经验勘察，巡检效率低，甚至部分区域的停电事件受限于监测条件而无法感知[1-2]。综合建设现状、数据规模和应用规划，部分省级电网企业已示范建设省级配电自动化主站，承载全省配电网设备状态和电网运行信息。省级电网企业在调度、运检和营销专业都已具备稳定的业务系统，因此基于省级架构部署的系统应用在实现数据汇聚的标准化管理以及资源整合方面具有明显的优势。

美国、日本等国家的配电自动化都比较成熟，负荷指标趋于平稳，已基本过渡到远程信息管理自动化阶段，停电管理系统（outage management system，OMS）更侧重于缩短故障停电时间以及预安排停限电，将停电状态和修复工作及时告知电力用户和内部管理部门。与其他国家相比，中国普遍存在不同性质停电事件的信息收集和维护入口不统一，缺少规范且结构化的信息汇总，制约了专业的深化管理[1-4]。此外，即使在中国较发达地区，配电自动化建设也尚处于大规模试点阶段，馈线自动化是配网故障停电分析的主要手段，其故障感知和故障定位的准确性完全依赖于线路上自动化终端的覆盖情况。在配电网故障定位技术领域，研究大多集中在基于监测馈线终端设备（feeder terminal unit，FTU）、开闭所终端设备（distribution terminal unit，DTU）等终端信号的故障定位方法，较常见的主要有遗传算法、蚁群算法等人工智能算法[5-10]。文献[8]利用不同区域透射波推导故障时刻的一致性建立条件方程，基于遗传算法完成目标求解。遗传算法全局优化较好，容错性高，但是在建立合理有效的数学模型效率方面有一定局限性。国外一些学者提出基于连续小波变换算法根据电压突变来分析线路故障，并讨论小波算法在配网故障定位中的应用[9]；文献[10]阐述了一种适用于径向分布系统的阻抗分析故障定位算法，根据相间的网络及负载的均衡性，结合相量计算推断出故障区间。文献[9-10]最后都指出各自故障定位算法的局限性，尤其当设备出现拒动或误动时，缺乏有效的过滤和识别干扰信号的方法，从而容易出现错判和漏判。在采用合适的算法进行配电网故障定位时需要充分考虑到配电网的实际情况，不仅要实现错误信息分辨，还需在信息不完整的基础上做出概率推断[11]。DS证据理论对于概率性推理非常有效，相比传统的概率论方法，它可以通过融合多个证据源证据，更好地把握问题的不确定性，在当前多个领域都取得了不错的效果[12-13]。

收稿日期：2019-05-29；修回日期：2019-11-07。
上网日期：XXXX-XX-XX。
国家电网公司科技项目（5216A019000R）。

本文设计的停电信息资源池（简称停电池）是一套面向差异化配电网建设的停电分析应用，弥补传统应用在自动化终端覆盖不足等条件下对停电事件分析的局限性，采用信号分层分级的研判机制结合DS证据理论算法，对停电事件更精细地划分，通过构建可靠而完整的结构化停电池指导抢修运维，约束和规范停电业务管理。

1　应用架构与数据处理分析

1.1　应用架构

停电池的整体设计思想是融合“营、配、调”各专业的业务数据，在多种场景条件下准确地判断停电性质，精确定位故障停电的故障区间。通过对停电信息的结构化存储和统一管理，一方面帮助业务人员更好地完成主动抢修，另一方面可以提升停电管理的规范性，以减少临时停电的比例。停电池的应用架构是由基础数据层、逻辑分析层、业务应用层、数据共享层组成。基础数据层是以省级配电自动化主站系统为载体，实现各级调度自动化能量管理系统（energy management system，EMS）、配电自动化系统（distribution management system，DMS）、用电信息采集系统、营销管理系统、工程生产管理系统（power production management system，PMS）、地理信息系统（geographic information system，GIS）等业务系统数据信息汇总，形成有效的数据信息流以支撑应用的分析处理。逻辑分析层即基于大数据分析融合基础数据层的数据信息进行停电事件研判。业务应用层是建立在综合数据分析基础上构建结构化停电信息资源池，准确反映配电网实时停运情况，同时对历史数据归档统计。数据共享层是将各环节融合分析的业务数据实现共享发布，支撑各专业系统协同交互，其整体框架如图1所示。

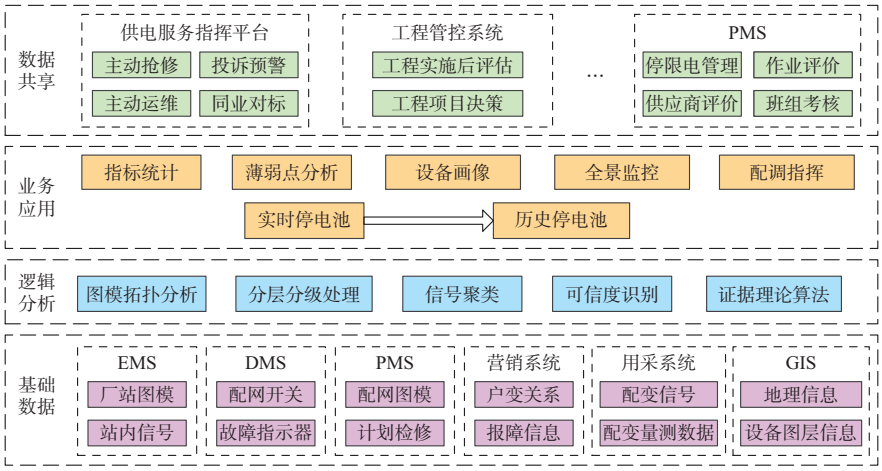


图1　停电池整体框架

Fig. 1　Overall framework of power outage pool

1.2　业务数据处理

停电池功能所依赖的配电网业务数据可分为静态信息和动态信息。静态信息主要有配电网线路的拓扑信息和检修类计划停电，计划停电一般不会出现数据缺漏，在本文中更多将其作为非故障类事件的匹配条件。动态信息涵盖配电网运行类数据，是故障停电感知和分析的数据基础，故障停电属于无法预知的突发事件，在故障发生后能否准确地进行故障定位是提升供电可靠性的关键要素，其研判分析方法是停电池功能最核心的一环。配电网运行类数据从数据源的层级结构上可以分为变电站级、馈线级和台区级，目前亟待解决的问题是基础数据来源于不同系统，质量参差不齐，过多冲突的无效信号提高了数据处理风险和筛查成本，因此需要针对各级数据的特点，增加数据清洗环节和信号时效性上的关联适配。

变电站级数据主要包括断路器的分合闸以及保护类信号。考虑到全省各地市的EMS厂家各异，存在系统异构的情况，因此数据转发采用规范E文件正向隔离传输，同时对保护信号丢失的情况做容错性处理，例如：信号逻辑上满足重合闸事件时，即使无关联保护信号上送也应归为故障类事件。

馈线级数据包括配电网开关跳闸、开关量测和过流保护信号等。如今配电网规模庞大，线路分支复杂，考虑到故障指示器成本低、安装便捷，很多地区都在大力建设，本文所涉及的馈线级数据也包括了故障指示器的量测信息、过流保护信号和翻牌动作信号。馈线级数据直接由接入省级主站的终端上送，实时性最高，其有效的信号动作时间可以作为停电发生时刻的主要参考依据。

台区级数据包括配电变压器停复电信号和用户报障投诉类信息。由于目前配电变压器终端(transformer terminal unit，TTU)覆盖范围有限，台区级信号大部分是由用电信息采集系统转发，因此本文涉及的台区级数据只考虑由营销系统转发的部分。台区级数据的主要问题在于用电采集系统的配电变压器实时停复电信号误报和漏报率较高，而与实时信号相比，用采系统每日的历史召测数据准确率在90%以上，通过数据过整天的定期校核，可以结合时间、历史数据缺陷等元素做概率统计，建立信号的可信度模型，作为多源数据之间逻辑冲突的仲裁依据。目前台区级的数据信息还未得到有效利用，但其信号数量以及拓扑分布也能从一定程度上反映故障性质和故障区间，可以作为中压侧信号不完备情况下的逻辑补充。

2　分层分级的综合研判方法

停电事件研判的首要问题是如何有效而准确地根据多源告警信息选择最合适的拓扑搜索起点，进而分析出停电性质以及故障区间。单独依赖某一类配电网线路信号的故障定位方法几乎都有其局限性[5-6]，造成误判的可能性较大。在这种情况下如果结合EMS站内信号或者台区信号融合分析，不仅可以丰富研判规则，而且可以很大程度上确保分析结果可靠。

2.1　主配网图模拓扑拼接

准确可靠的网络拓扑是融合多源信号分析停电事件最重要的基础条件之一。主配网图模拼接的基础是需要主配网两端具备共同的边界，对于边界的定义，电力系统内有较为统一的认识，即主网模型以10 kV出线开关为末段边界，配电网以10 kV出线开关为起点。相对于主网模型，配电网馈线等效为等值负荷，属于一类单端子设备，而配网模型则将变电站出线电缆或架空线路的起点等价为单端子端点号，等同采用主网负荷的端点号，等价的过程即拼接的过程。

主配网模型拼接示意如图2所示，首先对主网网络模型完成维护工作，在配网模型中通过搜索与之相匹配的配网模型边界设备，如果发现边界设备，表明存在需要与当前厂站模型拼接的配电网设备；反之则表明系统中无配网模型需要与之拼接，对主网模型增量更新即可。主网模型对系统增量更新后，标记与之匹配的配网模型，更新与边界设备相连的配网设备一端节点号。当配网模型发生改变后，以边界设备为基础重新建模。为屏蔽配网模型频繁变更对全网模型造成的影响，设计中采用量测平衡分析、遥信遥测一致性校验等动态校核方法，以保证主配模型边界设备状态及量测数据正确性。

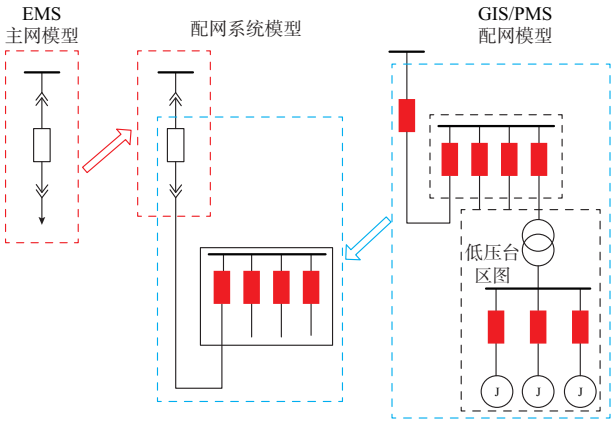


图2　主配网模型拼接维护示意图

Fig. 2　Schematic diagram of splicing maintenance of main network and distribution network model

2.2　分层分级研判规则

本文首先将停电事件分为确定性事件和未确定事件，通过按优先级分层对停电事件研判分析。确定性的停电事件是指故障停电、计划停电和临时停电等，将确定性事件的研判逻辑置为最顶层，该逻辑不主动与底层研判结果相关联，只定位于被动关联。而未确定停电事件包括台区停电以及客户报障事件，应用层面根据不完整信息快速匹配，自动关联最相关的停电事件或疑似事件，判断信号是否为某个确定性事件中的关联子信号。在信号优先级的设计上，变电站级告警优先于馈线级，馈线级告警优先于台区级，台区层面再细分为可信度较高的配变信号要优先于用户报障信息。

分层研判的处理逻辑相对独立运行，按照层级和优先级，下层研判分析时需要考虑到上层研判结果，而信号相对完备的情况下，上层研判无需再关联下层信号或研判结果。例如系统结合站内和馈线的告警信息就能完成故障研判时，无需再关联台区级信息。

2.3　分层分级研判流程

在保证图模数据质量的情况下，拓扑搜索起点的选择以及故障区间定位可通过各级信息源上传的告警信息结合拓扑分析完成。研判逻辑整体可以简化为先根据离散停电信号查询该层级是否存在关联信号，再按馈线和分支线进行信号分组，根据停电类别属于整线停电还是分支线停电，推理分析出最可能的跳闸位置，再进行故障区间的定位，整线停电和分支线停电的研判流程如图3和图4所示。

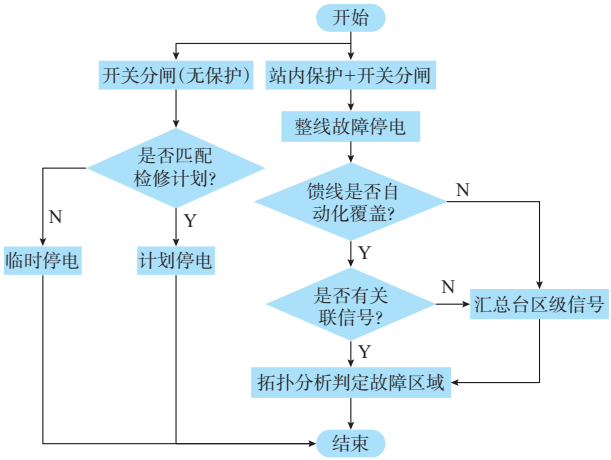


图3　整线停电分层分级研判流程

Fig. 3　Flow chart of line-wide power outage hierarchical grading judgment

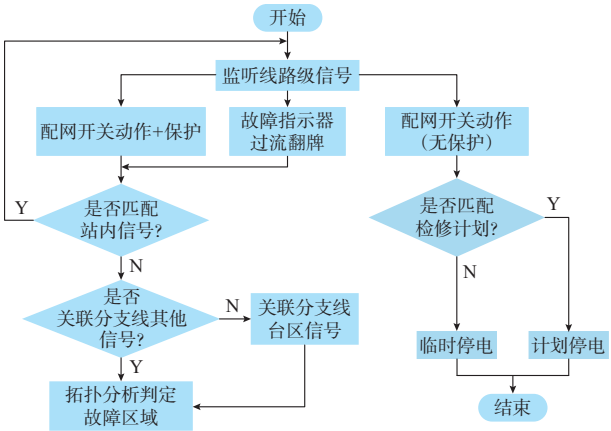


图4　馈线级分支线停电研判流程

Fig. 4　Flow chart of feeder level branch line power outage judgment

当线路暂未实现自动化终端覆盖或出现站内信号与馈线信号丢失，将会直接导致无法关联到确定性停电事件，不能完成全逻辑停电事件研判。这时需要关联台区级信号，结合分支线和配电变压器的静态关联关系拓扑分析，推理出最可能的跳闸位置。在部分极端情况下，需要人工核实非确定性事件的属实性和停电性质。另外，为确保台区级信号反向分析的准确性不受到信号质量的影响，有必要结合配变实时数据召测进行辅助研判。如图5所示，当缺少终端实时上送开关分闸信号的情况时，只能研判出分支线计划停电和非计划停电，而临时停电和故障停电的判定只能通过人工二次维护。这一类需要通过人工维护停电性质的关联记录可以作为工程项目决策的数据参考。

考虑到各地业务系统建设情况不同，在信号时延性、准确性上存在大大小小的差异，多级数据的融合在带来更多研判逻辑方向的同时，也可能会对研判结果产生负面影响[11]，例如在不同层级出现逻辑冲突的情况，这就需要额外通过算法来降低信号的耦合度，这部分内容将在下文详细阐述。

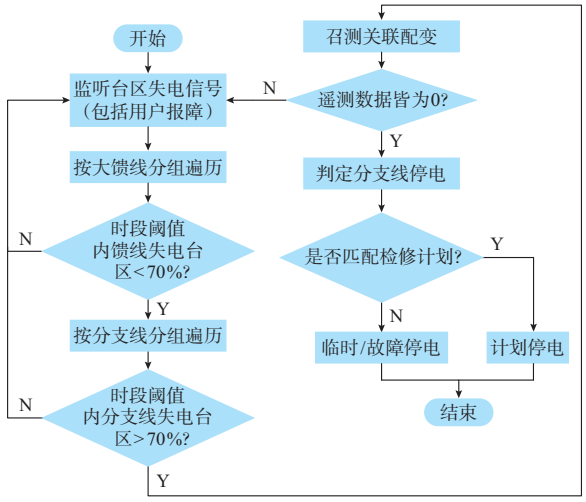


图5　台区级分支线停电研判流程

Fig. 5　Flow chart of distribution area-level branch line power outage judgment

3　基于DS理论的故障信号闭环校核方法

3.1　信号质量分析

在配网自动化水平较高的区域，智能监测终端覆盖率可观，当配电网发生故障时能够获取大量故障信号，按照第2章阐述的分层分级研判方法均能精确、快速地定位出故障区间。然而，目前在很多自动化水平不高的地区或农村配电网，通常没有安装DTU和FTU等智能监测终端，其自动化建设方案多采用成套化开关为主，故障指示器为辅的技术路线。对于故障指示器本体而言，因配电网中性点接地方式和检测方法多样化，再加上户外运行环境的不确定性，使得故障指示器也会偶尔误动或拒动。此外，如果受到故障瞬时冲击电流而损坏，电源将不能持续性供电而造成指令紊乱，非线性负载产生的谐波和大电机的启动都会导致故障误判[14]。

此外，配电网相关数据源分布于“营、配、调”各个专业系统，各系统数据存在实时性失配以及准确性问题，例如采集系统的台区数据在采样频率与实时性方面无法做到与EMS等系统的实时性精确匹配，且台区停电事件也存在大量的漏报、误报等信号质量问题。在这种情形下，传统的故障定位方法极可能出现误判，导致抢修人员无法获知准确的故障区间，降低了故障抢修的效率。

这些信号质量问题有一部分情况可以通过反校

分析来识别，例如站内有保护信号，但无断路器动作信号，同时线路上DTU/FTU有开关动作信号和短路事故总信号，故障指示器有过流翻牌动作，则推断站内断路器动作信号漏报，这属于明显可识别的信号漏报问题。另一部分情况可能出现两者皆可能发生误报或漏报，例如分支线故障指示器发生过流翻牌动作，但关联台区未有停电信号上送，既有可能是故障指示器误动作，也有可能是配电变压器信号漏报，这类信号质量问题按传统逻辑规则不容易分析，需要结合算法进行概率性的推断。

3.2　基于概率二次分配的证据理论算法

配电网发生故障时，在假定每一类告警信息都独立正确的前提下，它们都可以确定故障区间，但实际告警信息都存在误报漏报的几率使得各自信息所确定的故障区间都存在错误的可能性。DS证据理论作为一种不确定推理方法，适用于融合多个证据，综合决策以提高分析结果的可靠性，其主要特点可以总结为：满足比贝叶斯概率论更弱的条件，不需知道先验概率，能够很好地表示“不确定”，被用来处理信息融合、情报案件等不确定数据的决策分析[15]。

当证据之间不冲突时，通过证据理论融合后，信任度高的目标的概率权重可以得到进一步的加强。但如果故障信息发生误报时，则很有可能会出现由信号误报产生的证据与其他正确的信息所得到的证据相冲突，当证据冲突度较大甚至完全冲突时，通过上述组合规则融合后会出现与实际情况相悖的结果。因此，基于原有DS证据理论基础上，如果碰到近似等同概率、高冲突或相悖证据等界限时，不能强行选择某一命题作为结果，因为这极有可能会造成误判。针对DS证据理论存在的局限性，需要对组合规则进行改进，在提升算法容错性的同时，也要保证算法的计算效率[16-17]。

本文设计了一种基于信号可信度的分支证据预处理方法，按照证据间的关联程度分配权重值，尽可能避免完全冲突的证据参与融合，根据新的分配概率再进行分析的方式不会额外增加算法的计算量。重新分配概率后的融合结果与分配前的融合结果在数值上会有变化，但是融合结果之间的相对概率还是保持一致的。在对现场历史信号的统计分析中发现，馈线级信号漏报和误报的情况普遍具有规律性和重复性，可以采用类似于处理台区实时停复电信号的方式，从关联设备的历史数据质量以及分析结果反向校核等维度去建立信号可信度模型，为DS证据理论算法的证据概率二次分配提供数据基础。

3.3　差别化故障分析

当故障事件发生后，系统根据分层分级研判逻辑预处理故障信号，如果满足优先判定规则，可以直接给出决策结果。当不满足优先判定规则时，需要先根据故障信息和网络拓扑结构分析出可疑故障区间结果集，然后再结合信号可信度，计算出新的概率值赋予证据，通过改进的DS证据理论进行融合计算，最后得出决策结果。根据决策结果和静态拓扑关系，可以分析出理论告警信号，其与实际上送告警信号的校核结果，可以作为信号可信度的更新因子，整个环节实现闭环分析和处理，处理流程如图6所示，实际案例分析可参见本文附录A。

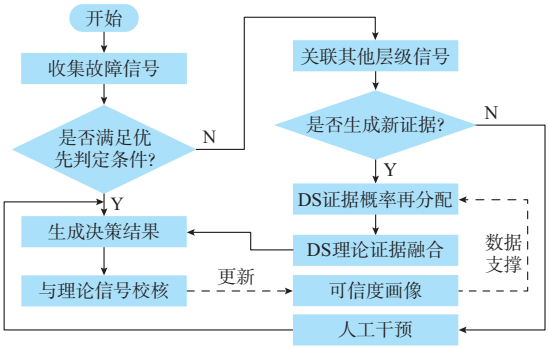


图6　故障分析闭环校核流程

Fig. 6　Flow chart of fault analysis closed-loop check

4　结论

本文提出了通过融合各专业的业务数据实现在差异化的条件下对停电事件更精确地感知和分析的方法，对配电网停运事件的研判算法进行了详细的设计分析。其构建结构化停电池的方式为进一步沉淀企业数据价值、提升数据共享成效提供了思路，同时也为建设数据开放、共享生态的数据中台提供基础。在2019年初，停电池功能在湖南省级配电自动化主站系统中完成部署，并陆续通过工程化和实用化验收。在信息资源共享层面已实现与大数据中心、供电服务指挥平台、工程项目管理系统的信息交互，有效支撑了故障主动抢修、电能质量同业对标和工程项目管理。随着中压线路的自动化改造和TTU建设的大力推进，主站可监测范围将延伸至低压分路和表箱，各级信号的准确性和完整性方面都会有质的提升，这将为提升供电服务质量提供更有力的数据保障。

本文研究中所采用的信号可信度概率分配方法较为依赖历史运行数据，后续的研究将结合管控层面的厂商或设备的历史评价等现有数据资源，对可信度建模方法做更深入的研究和改进。

附录见本刊网络版（http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx），扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参 考 文 献

[1] 刘健，赵树仁，张小庆．中国配电自动化的进展及若干建议[J]．电力系统自动化，2012，36(19)：6-21
LIU Jian, ZHAO Shuren, ZHANG Xiaoqing. Development of distribution automation in China and some suggestions [J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 6-21.

[2] 崔立忠，张瑞雪，刘涛，等．复杂配电自动化系统可靠性计算及设备布局规划[J]．电力系统自动化，2017，41(20)：84-91.
CUI Lizhong, ZHANG Ruixue, LIU Tao, et al. Reliablity calculation and equipment layout planning for complex distribution automation system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 84-91.

[3] GEORGILAKIS P S, HATZIARGYRIOU N D . A review of power distribution planning in the modern power systems era: models, methods and future research [J]. Electric Power Systems Research, 2015, 121: 89-100.

[4] 郇嘉嘉，王钢，李海锋，等．多目标决策分析的电网综合停电管理模型[J]．电网技术，2013，37(10)：2802-2807.
HUAN Jiajia, WANG Gang, LI Haifeng, et al. A comprehensive outage management model based on multi-objective decision analysis [J]. Power System Technology, 2013, 37(10): 2802-2807.

[5] 严太山．基于人类进化算法的配电网故障定位[J]．仪器仪表学报，2015，36(3)：695-700.
YAN Taishan. Fault location for distribution network based on the human evolutionary algorithm [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2015, 36(3): 695-700.

[6] 黄飞腾，翁国庆，王强．带分布式电源的配电网电能质量扰动源定位[J]．电力系统自动化，2015，39(9)：150-155.
HUANG Feiteng, WENG Guoqing, WANG Qiang. Location of power quality disturbance source in distribution network with distributed generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 150-155.

[7] 朱彦沛，邢宁哲，纪雨彤，等．基于交互式主动探测的电力综合数据网故障定位算法[J]．电力系统自动化，2017，41(4)：150-155.
ZHU Yanpei, XING Ningzhe, JI Yutong, et al. Fault location algorithm of integrated data network for power system based on interactive detection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4): 150-155.

[8] 郭宁明，杨飞，覃剑，等．基于遗传算法及信号谱分析的电网故障定位方法[J]．电力系统自动化，2016，40(15)：79-85.
GUO Ningming, YANG Fei, QIN Jian, et al. Grid fault location method based on genetic algorithm and signal spectrum analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 79-85.

[9] BORGHETTI A, CORSI S, NUCCI C A, et al. On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2006 (28): 608-617.

[10] RAMAR K, NGU E E. A new impedance-based fault location method for radial distribution systems [C]// IEEE PES General Meeting, July 25-29, 2010, Providence, USA: 1-9.

[11] 罗凤章，杨文涛，张天宇，等．配电自动化数据传输有误对配电系统供电可靠性的影响[J]．电力系统自动化，2018，42(19)：10-17.
LUO Fengzhang, YANG Wentao, ZHANG Tianyu, et al. Influence of distribution automation data transmission errors on power supply reliability of distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(19): 10-17.

[12] 晏娟，彭敏放，沈美娥，等．基于信息熵与证据融合的接地网故障诊断[J]．电力系统及其自动化学报，2017，29(12)：9-13.
YAN Juan, PENG Minfang, SHEN Mei' e, et al. Fault diagnosis of grounding grids based on information entropy and evidence fusion[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2017, 29 (12): 9-13.

[13] 鲍海波，郭小璇，韦化．结合证据理论和双层规划的电压稳定不确定分析[J]．电力系统自动化，2018，42(5)：121-126.
BAO Haibo, GUO Xiaoxuan, WEI Hua . Uncertainty analysis of voltage stability based on evidence theory and bilevel programming [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(5): 121-126.

[14] 陈煦斌，秦立军．配网故障指示器最优配置研究[J]．电力系统保护与控制，2014，42(3)：100-104.
CHEN Xubin, QIN Lijun. Optimal configuration of fault indicator in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(3): 100-104.

[15] 孙锐．基于D-S证据理论的信息融合及在可靠性数据处理中的应用研究[D]．成都：电子科技大学，2011.
SUN Rui. Research on D-S evidence theory based information fusion and its application in reliability data processing [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2011.

[16] 汪永伟，刘育楠，杨英杰，等．D-S证据理论中冲突处理的新方法[J]．计算机工程与设计，2013，34(12)：4316-4320.
WANG Yongwei, LIU Yunan, YANG Yingjie, et al. New approach for conflict process in D-S evidence theory [J]. Computer Engineering and Design, 2013, 34(12): 4316-4320.

[17] 刘晓东，邓锦宇．基于冲突证据修正的DS改进方法[J]．电子测量与仪器学报，2017，31(9)：1499-1506.
LIU Xiaodong, DENG Jinyu. Improved DS method based on conflict evidence correction [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017, 31(9): 1499-1506

冷　华（1982—），男，博士研究生，高级工程师，主要研究方向：配电自动化、电力物联网。E-mail：lh1435@163.com

钱玉麟（1987—），男，通信作者，硕士，主要研究方向：配电自动化、电力物联网。E-mail：qianyulin@sgepri.sgcc.com.cn

朱吉然（1985—），男，硕士，高级工程师，主要研究方向：配电自动化、信息化。E-mail：homebbs2085@163.com

（编辑　代长振）

Function Design of Power Outage Information Pool for Provincial Distribution Automation Main Station

HUA Len[1]，*QIAN Yulin*[2]，*ZHU Jiran*[3]，*TANG Haiguo*[3]，*ZHANG Weiwei*[2]，*ZHANG Haiwen*[4]

(1. College of Electrical and Information Engineering，Hunan University，Changsha 410082，China；2. NARI Group Corporation (State Grid Electric Power Research Institute)，Nanjing 211106，China；3. Electric Power Research Institude of State Grid Hunan Electric Power Company Limited，Changsha 410004，China；4. Yongzhou Electric Power Supply Company of State Grid Hunan Electric Power Company Limited，Yongzhou 425000，China)

Abstract: The construction of distribution network automation is still in a large-scale pilot stage. In many areas，the means of fault information perception and location are limited. The information of different power outage events come from multiple business systems. It is particularly urgent to achieve accurate analysis of power outage events under limited conditions. Combining with the actual business process of power outage management of the power utilities，this paper designs the function of power outage information resource pool，comprehensively analyzes the data of multi-layer main network and distribution network of substations，feeders，distribution transformer areas and users，establishes the signal credibility model on the basis of hierarchical study and judgment. Combined with DS evidence theory algorithm fusion analysis，multi-dimensional flexible mining and analysis of power outage events，improve fault tolerance of fault location，meet the requirements of building a reliable structured power outage information resource pool to achieve data sharing and publishing in different scenarios.

This work is supported by State Grid Corporation of China（No. 5216A019000R）.

Key words: power outage analysis; distribution automation; big data; fault location; DS evidence theory

附录A

DS证据理论中，识别框架U是由互斥且有限个研究对象构成的完备集合。m是U的基本概率分配（basic probability assignment，BPA）函数，$m:2^U \rightarrow [0,1]$，且满足：

$$m(\varnothing)=0 \tag{A1}$$

$$\sum_{A\subseteq U} m(A)=1 \tag{A2}$$

其中$m(A)$为A的基本可信度，式（A1）表示空集的可信度始终为0，式（A2）表示所有命题的可信度之和为1。

假定从n个信息源获取到n个证据，基本概率分配为$m_1,m_2,m_3,\cdots\cdots,m_n$，如果它们相互独立，那可以用式（A3）来表示多个证据体的合成规则。

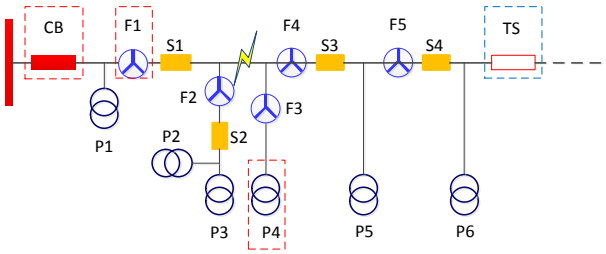
$$m(A)=\begin{cases} 0, A=\varnothing \\ \dfrac{1}{1-k}\sum\limits_{A_i=A}\prod\limits_{1\leqslant j\leqslant n} m_j(A_i), A\neq\varnothing \end{cases} \tag{A3}$$

其中证据冲突系数

$$k=\sum_{A_i=\varnothing}\prod_{1\leqslant j\leqslant n} m_j(A_i) \tag{A4}$$

k反映了各证据间的冲突程度，介于0和1之间，k越大代表冲突程度越高，反之表示冲突程度越小。

附录中给出的示例是基于断路器、分段开关等相互配合的馈线自动化配电网，这种配电网一般较为简单，主要分为辐射型网络和环形网络结构，除了正常配电网的主要构成设备外，为了方便定位故障区间，一般在馈线的重要位置会装设具有遥信功能的故障指示器。以湖南省永州市A线路为例，如图A1为示，CB表示断路器，F标识故障指示器，S表示分段开关，P代表配变台区，TS标识联络开关。



图A1　接线图示例A
Fig. A1　Wiring diagram example A

示例A在S1-S2-S3主干线区域发生了短路故障，若信号完备，根据分层分级研判规则，结合站内信号和F1过流翻牌、F4未动作即可分析出故障区间在（S1，S2，S3）。在F4发生误动且P5复电信号漏报的情况下，主站收到故障相关信号包括断路器CB分合闸，过流保护信号，F1、F4过流翻牌动作，P1、P2、P3、P4、P5、P6台区的停电信号，随后收到常断点开关TS的合闸信号，以及陆续收到除P4、P5外所有台区的复电信号，P4台区的用户报障信号。根据出线断路器和故障指示器信号推断的故障区间为（S3，S4）、（P4），根据台区P4失电信号所推断的范围为（S1，S2，S3），根据P5失电信号推断范围为（S3，S4），根据用户报障信号推断的范围是（P4）、（S1，S2，S3）。按传统故障研判方法，当F4发生误报会导致研判结果为F4下游区域发生故障，即（S3，S4），从而导致应用虽捕获到故障，但故障区间未正确定位。

根据历史数据统计，永州市的线路故障和台区故障的比率为6比1，故有：

$$\begin{cases} M_1\{(S_3,S_4),(P_4)\}=\left\{\frac{6}{7},\frac{1}{7}\right\} \\ M_2\{(S_1,S_2,S_3)\}=1 \\ M_3\{(S_3,S_4)\}=1 \\ M_4\{(S_1,S_2,S_3),(P_4)\}=\left\{\frac{6}{7},\frac{1}{7}\right\} \end{cases} \tag{A5}$$

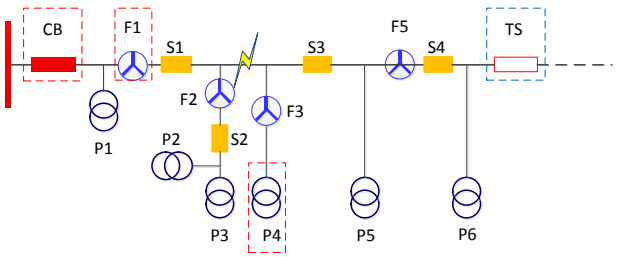
站内信号一般较为可靠，故案例无需对站内信号作概率分配。馈线和台区级信号根据可信度数据模型可知，台区P5信号的漏报率为70%，台区P4信号的误报率为20%，F1误动概率为10%，F4的误动概率为40%，故障指示器信号准确概率为54%，P5信号准确上送概率为30%，用户报障为非确定性事件，修正系数可参考台区信号准确率取0.8。进行二次处理后，改进后证据如式(A6)所示：

$$\begin{cases} M_1'\{(S_3,S_4),(P_4),\varnothing\}=\{0.46,0.08,0.46\} \\ M_2'\{(S_1,S_2,S_3),\varnothing\}=\{0.8,0.2\} \\ M_3'\{(S_3,S_4),\varnothing\}=\{0.3,0.7\} \\ M_4'\{(S_1,S_2,S_3),(P_4),\varnothing\}=\{0.69,0.11,0.2\} \end{cases} \tag{A6}$$

通过式(A3)对这4条证据进行融合，根据式(A4)，k的计算结果为0.81，代入k得到式(A7)所示：

$$\begin{cases} M\{(S_3,S_4)\}=0.029 \\ M\{(S_1,S_2,S_3)\}=0.937 \\ M\{(P_4)\}=0.0012 \\ M\{\varnothing\}=0.067 \end{cases} \tag{A7}$$

当出现终端设备覆盖程度有限时，如图A2所示。故障断面的站内信号有CB分合闸，过流保护，与示例A的区别在于馈线信号仅有F1过流翻牌动作，传统的研判方法将会因为缺少F4的实际信号做到进一步的故障定位。



图A2　接线图示例B
Fig. A2　Wiring diagram example B

按分层分级研判方法根据站内信号和馈线信号可以定位故障区间为(S_1,S_2,S_4)、(P_4)，根据台区P_4失电信号所推断的范围为(S_1,S_2,S_3)，根据P5失电信号推断范围为(S_3,S_4)，根据用户报障信号推断的范围是(P4)、(S_1,S_2,S_3)，对4条证据融合计算后如式(A8)所示：

$$\begin{cases} M\left\{\left(S_1,S_2,S_4\right)\right\}=0.072 \\ M\left\{\left(S_3,S_4\right)\right\}=0.006 \\ M\left\{\left(S_1,S_2,S_3\right)\right\}=0.901 \\ M\left\{\left(P_4\right)\right\}=0.0029 \\ M\left\{\varnothing\right\}=0.023 \end{cases} \tag{A8}$$

根据融合结果可以判别，在出现信号误报或是终端覆盖不完整的情况下，结合概率二次分配的证据理论算法的故障区间决策结果均为(S_1,S_2,S_3)，与原设定相符，很好地规避了信号质量对结果造成的影响。以故障主动抢修为例，当停电池应用捕获到实时故障信息，将综合分析结果推送至全业务消息总线，即时转发给供电服务指挥平台，完成主动抢修工单的派发和下一步的故障抢修，由供服系统反馈给主站整体进度，主站侧归档历史数据，形成流程闭环。