

基于网络树状图和改进 D-S 证据理论的配电网故障定位方法

高湛军¹, 李思远¹, 彭正良², 赵 耀¹

(1. 山东大学 电网智能化调度与控制教育部重点实验室, 山东 济南 250061;

2. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250100)

摘要:针对配电网故障信息出现异常尤其是不可识别异常而导致误判的问题,提出了一种基于网络树状图和改进 D-S 证据理论的配电网故障定位新方法。该方法的突出优点在于使用多源信息进行故障定位,可避免因单源信息发生异常导致的误判。首先提出了一种新的基于网络树状图的搜索算法,该算法利用配电网故障时产生的故障指示器信息、配变报警信息和电话投诉信息建立相应的网络树状图,并通过搜索网络树状图进行故障初步定位。然后利用改进 D-S 证据理论将每种故障信息的定位结果进行信息融合,得到最终的定位结果。实例结果表明所提方法有效、可行,可以解决故障信息出现不可识别异常时的定位问题。

关键词:配电网;故障定位;网络树状图;D-S 证据理论;信息融合

中图分类号:TM 761

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.06.010

0 引言

配电网作为电力供应的最后一环枢纽,直接面向用户,保障配电网的供电质量和可靠性显得尤为重要。在故障发生后,如何快速定位故障、及时抢修和恢复故障区域供电非常重要^[1-2]。

目前,配电网故障定位主要有利用配电自动化系统定位、利用故障指示器定位和利用电话投诉系统定位 3 种方式,3 种定位方式分散独立并各具优缺点。目前,由于不同地区自动化程度不同,这 3 种方式的应用方式也不尽相同。

在自动化程度较高的地区,由于采用集中控制方式,配电网配备大量智能监测终端,可以实时获取配电网的遥信量和遥测量,因而故障定位简单准确。但是很多自动化程度较低的地区仍使用就地控制方式,通常没有装设智能监测终端,一般依靠故障指示器信息或者电话投诉信息进行事故后分析。利用故障指示器信息进行故障定位与利用配电终端 (FTU) 遥信量信息进行故障定位方法类似,主要分为直接法和间接法。直接法最典型的算法是矩阵算法^[3-5],矩阵算法定位准确,但是对故障信息的准确度要求高,容错性较差。间接算法主要包括各类人工智能算法,如遗传算法^[6-7]、免疫算法^[8]、贝叶斯算法^[9]、蚁群算法^[10-11]等。人工智能算法在一定程度上解决了故障信息发生可识别异常时的容错性问题。文献[12]根据网络层次利用电话投诉信息来确定设备

的隶属度函数,利用模糊函数进行定位,在投诉电话完备的情况下也能准确定位故障区域。但是故障发生后并不一定所有停电区域的居民都会投诉,因此电话投诉信息可能会出现缺失导致误判。以上出现误判问题的主要原因是故障定位的信息源单一,当信息出现不可识别异常时就会导致定位错误。文献[13]将开关量信息、故障录波信息及保护设备同步测量的电气量信息进行融合后应用到输电网的故障定位中,但是这种方式对测量设备要求较高,不适用于配电网。

本文结合配电自动化信息、故障指示器信息、配变报警信息和电话投诉信息,提出了一种基于多源信息融合的故障定位方法。首先利用配电网发生故障时产生的多种故障信息,包括故障指示器信息、配变报警信息和电话投诉信息分别形成网络树状图。网络树状图的作用是简化配电网结构,整合故障信息,以实现分层故障定位。最后用改进的 D-S 证据理论将每种故障信息的定位结果进行融合,得到最终定位结果。本文方法通过多信息融合解决了故障信息误报或丢失时的定位问题,大幅提高了配电网故障定位的容错性和供电可靠性。

1 基本框架

故障定位流程图如图 1 所示。故障发生后,系统获取配电网的拓扑结构和故障信息,包括故障指示器信息、配变报警信息和电话投诉信息。根据所得故障信息分别进行拓扑搜索得到相应的网络树状图,然后通过基于网络树状图搜索的算法得出相应故障区域。最后将各类故障信息得到的故障区域形成证据,通过 D-S 证据理论进行融合计算,最后得出定位结果。

收稿日期:2016-12-22;修回日期:2018-04-16

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277113);国家电网公司重大科技项目(031[2012]19)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277113) and the Key Science & Technology Program of SGCC(031[2012]19)

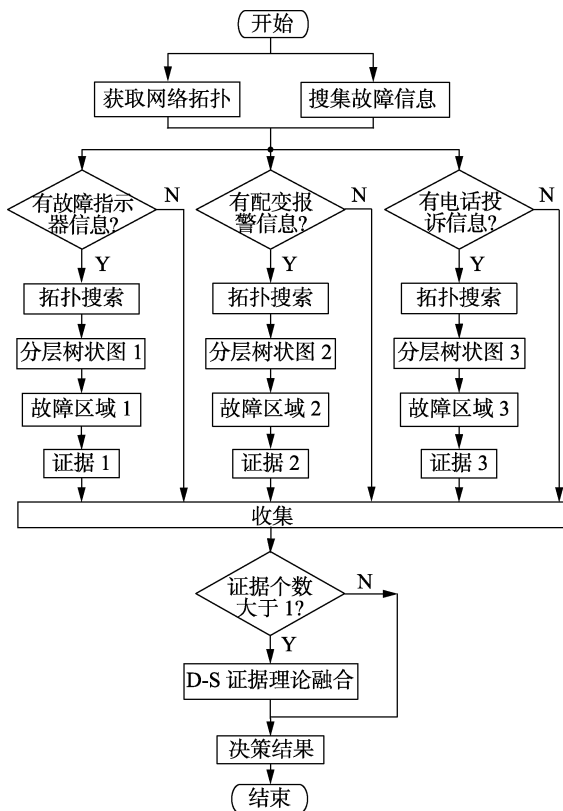


图1 故障定位流程图

Fig.1 Flowchart of fault location

2 基于网络树状图搜索的故障初步定位

2.1 网络树状图的基本概念

配电网的网络树状图是根据配电网的网络结构,由电源侧依次枚举出各个网络节点并按照配电网结构进行连接所形成的树状图。网络树状图具有良好的扩展性,适合应用于结构繁杂的配电网。

本文在建立系统网络树状图时,将母线、馈线段和用户区域作为节点,将开关设备和配变作为弧,因此所有开关设备和配变都位于2个节点之间。

在配电网的网络树状图中,采用分层的方式标出各开关及设备在配电网网络树状图中的位置,其基本思路为:从变压器母线节点处开始沿着功率流向搜索,当搜索到1个开关或设备时,将这个开关或设备定为第 j 层,然后再以该开关或设备后的节点作为起始点继续搜索与该节点相连的分支,找到新的设备时,则将该开关或设备定为第 $j+1$ 层,重复上述过程,最终遍历整个配电网。在对网络分层的过程中,“层次”的概念表现在连接关系中离电源越近的设备其层次越低^[12]。

对于给定的配电网,首先对网络中的节点进行编号,为了减少搜索量,本文按照潮流走向对非末端节点优先编号,然后建立网络树状图。若配电网结构图有 n 个节点,则会建立1个包含 n 个节点的网络树状图,若节点 i 和节点 j 相连且电流经过单个开

关设备或变压器,则在网络树状图中用连线表示,若节点 i 和节点 j 不相连,则无需表示。图2为配电网结构图,图中,CB表示断路器;S表示分段开关;SL表示联络开关;T表示配变;FI表示分布在各个开关处的故障指示器;A—G区为用户区;开关 S_1 与开关 S_3 之间发生了故障。图2所示配电网结构图所对应的网络树状图如图3所示。

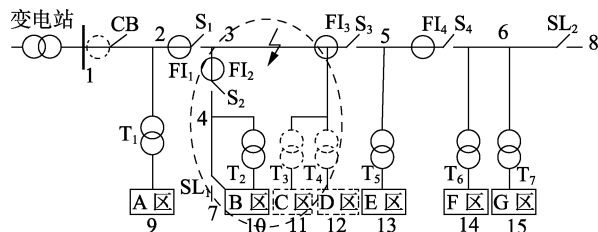


图2 简单配电网结构图

Fig.2 Structure of simple power distribution system

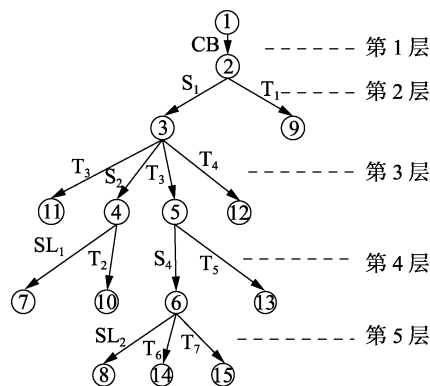


图3 配电网网络树状图

Fig.3 Tree structure diagram of power distribution system

从网络树状图中可以看出,网络树状图的右侧序数表示开关设备或配变所在网络树状图的层数,在网络树状图中属于相同层的设备定义为同层设备。同时,为了便于理解网络树状图中节点之间的连线,用与之相对应的开关设备或配变标注。

同层设备可能属于不同的节点,1个节点下可能包含多个设备,并分别分布在电网的不同馈线支路中。

2.2 故障信息与故障位置和网络树状图的关系

配电网一般分为闭环结构和开环结构,无论对于哪种结构,当收到故障报警信息时,故障位置与故障信息都有一定的对应关系。现以图2为例,说明每种故障信息和故障位置的关系。

图2中故障位置发生故障到故障隔离后,产生的故障报警信息有 FI_1 信息、 T_4 报警信息和 T_4 下游的用户投诉信息、 T_3 报警信息和 T_3 下游用户的电话投诉信息。

a. 对于故障指示器信息,位于故障上游的故障指示器均会因流过过电流报警,而位于故障下游的故障指示器都不会报警,因此故障必定位于

最下游报警的故障指示器与下一个不报警的故障指示器之间,即故障位于 FI_1 、 FI_2 和 FI_3 之间的区域。

b. 对于配变报警信息,分段开关跳开隔离故障后,隔离区域因停电而配变报警,报警信息还包括高压跌落开关状态信息,若高压跌落开关断开则说明变压器本身故障,若未断开则说明配变上游故障,因此报警配变与不报警配变间的分段开关就是故障区域的边界。图2中有 T_4 和 T_3 报警,且高压跌落开关未断开,则故障位于与 T_4 、 T_3 相邻的开关之间,即故障位于 FI_1 、 FI_2 和 FI_3 之间的区域。

c. 对于电话投诉信息,当收到电话投诉时,首先判断电话投诉用户属于哪一个配变,再根据该配变所在馈线段是否含有其他配变来确定故障位于该配变还是位于该变压器上游馈线断。若只有1台配变的用户投诉,且该配变所在该段馈线只有1台配变,则无法判断故障属于该配变还是属于上游馈线段,即可疑故障区域包括该配变及其上游馈线段,若停电区域内有多个配变,却只有1台配变有用户投诉时,则判断故障区域位于该配变;如果有2台或2台以上的配变上的用户投诉,则可以确定故障区域在馈线段而不在配变。图2中有 T_4 与 T_3 下游有用户投诉,则可疑故障区域为 FI_1 、 FI_2 和 FI_3 之间的区域。对比网络树状图可知,故障区域一定是位于相邻2层的开关设备之间或者位于某配变。因此根据获取的故障报警信息搜索网络树状图,可以得出故障区域位于最后一层报警设备与下一层不报警设备之间的区域或者是最后一层不报警设备和下一层报警设备之间。

2.3 基于网络树状图的配电网故障初步定位

2.3.1 故障定位基本步骤

基于网络树状图搜索的故障定位的基本步骤如下。

a. 获取配电网的拓扑结构,根据故障信息种类形成相应的网络树状图。

b. 根据配电网拓扑结构形成可疑故障区域库。为了与网络树状图搜索算法一致,本文将网络节点的连接设备作为可疑故障区域的边界,即可疑故障区域就是开关设备的馈线段或配变下游的用户,由于不考虑用户侧的故障定位,将配变下游的用户区域与配变一起用配变表示。因此可疑故障区域库由馈线段和配变组成。

c. 根据获得的故障信息逐层搜索网络树状图,根据判定准则及对比可疑故障区域库得出故障定位结果。判定准则为:对于故障指示器信息,带有故障信息的最高层开关设备与下一层开关设备之间的区域或者该区域上的配变为故障区域,对于配变报警信息和电话投诉信息,不带故障信息的最高层开关

设备与下一层开关设备之间的区域或者配变为故障区域。

2.3.2 实例分析

现以图2为例说明故障定位的基本过程。联络开关正常工作时断开将配电网分成2个辐射形的网络,当如图所示位置发生故障时,故障隔离后通过闭合联络开关恢复故障区域下游的供电。

(1) 断路器动作信息、故障指示器报警信息。

故障发生后,收集到的故障报警信息为CB断开, FI_1 发出故障告警信息,如图2所示,定位过程如下。

a. 形成配电网的网络树状图。由于本文只考虑断路器和故障指示器信息,所以只将断路器和故障指示器作为节点间的连接设备,则此时图2所示配电网只需前6个节点,根据拓扑形成网络树状图,如图4所示。

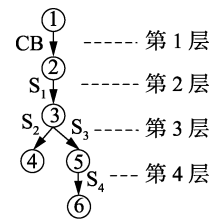


图4 基于断路器、故障指示器信息的网络树状图

Fig.4 Tree structure diagram based on breaker and fault indicator information

b. 建立可疑故障区域库。故障区域以断路器和故障指示器所在的开关设备为边界,末端均用0表示,则可疑故障区域库为 $\{(CB, S_1), (S_1, S_2, S_3), (S_2, 0), (S_3, S_4), (S_4, 0)\}$,其中, (CB, S_1) 表示以CB和 S_1 为边界的馈线段, $(S_2, 0)$ 表示分段开关 S_2 下游的馈线段,其他类似。这里的故障区域不仅指这段馈线,也包括这条馈线段上所接的配变,因为配变故障也有可能引起上游故障指示器报警。

c. 根据收到的断路器动作信息和故障指示器 FI_1 信息后,开始逐层搜索网络树状图,搜索到第1个设备断路器CB属于第1层,对比收到的报警信息,CB动作。继续搜索第2层,搜索到设备分段开关 S_1 ,对比接收到的报警信息后, S_1 报警,至此所有报警设备全部找到,由此可知故障位于第2层故障报警设备与第3层设备之间。继续搜索网络树状图的第3层,搜索到 S_2 和 S_3 (均属于第3层),继续搜索第4层,搜索到 S_4 ,由于 S_4 位于第4层,则表示第4层设备已经搜索完毕。将第2层设备和第3层设备进行任意组合,则共有 (S_1, S_2) 、 (S_1, S_3) 、 (S_1, S_2, S_3) 3种组合,对比可疑故障区域库,可知故障区域为 (S_1, S_2, S_3) 。根据定位结果可知仅由断路器和故障指示器信息确定的故障区域为开关 S_1 、 S_2 和 S_3 包围的馈线段和该馈线段上的配变 T_3 、 T_4 。

(2) 配变报警信息。

故障发生后,分段开关动作将故障区域隔离,被隔离的区域停电,区域内的变压器 T_3 、 T_4 停电报警,且高压跌落开关正常,如图2所示。定位过程如下。

a. 形成配电网所描述的网络树状图。这里变压器作为报警设备,因此需要考虑变压器,将开关设备和变压器作为节点间的连接设备,配电网共有15个节点,编号如图2所示,根据拓扑形成网络所描述的网络树状图同图3,此处省略。

b. 建立可疑的故障区域库。配变及配变下游区域均算作配变本身,这里不考虑联络开关下游的区域,则可疑故障区域库为 $\{(CB, S_1), (T_1), (S_1, S_2, S_3), (T_4), (S_2, SL_1), (T_2), (T_3), (S_3, S_4), (T_5), (S_4, SL_2), (T_6), (T_7)\}$ 。其中, (T_1) 表示故障区域为配变 T_1 本身,其他含义类似。

c. 根据收到的配变 T_4 及 T_3 上传的信息可知,故障位于其上游的馈线,搜索网络树状图,首先搜索第1层,搜索到断路器CB,继续搜索第2层,搜索到 S_1 和 T_1 ,但 T_1 没有报警信息,继续搜索第3层,搜索到 S_2 、 S_3 、 T_4 和 T_3 均位于第3层,且 T_4 、 T_3 为报警的配变,则故障位于同一层的开关与上一层的开关之间,即位于第2层开关和第3层与 T_4 、 T_3 同一层的开关之间,将2层开关任意组合,共有3种组合,分别是 (S_1, S_2) 、 (S_1, S_3) 、 (S_1, S_2, S_3) ,对比可疑故障区域库可知故障区域为 (S_1, S_2, S_3) 。根据定位结果可知仅由配变信息确定的故障区域为开关 S_1 、 S_2 和 S_3 包围的馈线段。

(3) 电话投诉信息。

故障发生后,分段开关动作隔离故障区域,被隔离的区域停电,部分用户会向电力部分电话反映停电情况。当收到电话投诉信息,如图2中C区和D区用户电话投诉后,先确定该投诉用户属于配变 T_4 和 T_3 。定位过程如下。

a. 形成配电网的网络树状图。这里用户作为报警信息源,而用户连接于配变,因此需要考虑变压器,将开关设备和变压器作为节点间的连接设备,配电网共有15个节点,编号如图2所示,由网络拓扑形成网络树状图,由电话投诉信息所确立的网络树状图与配变报警信息的网络树状图相同,此处省略。

b. 建立可疑的故障区域库。配变及其下游区域均看作配变本身,这里不考虑联络开关下游的区域,则可疑故障区域库与配变信息可疑故障区域库一致。

c. 根据收到停电投诉电话判断出用户位于配变 T_4 ,搜索网络树状图,首先搜索第1层,搜索到断路器CB,继续搜索第2层,搜索到 S_1 和 T_1 ,但 T_1 下游用户没有报警信息,继续搜索第3层,搜索到 S_2 、 S_3 、

T_4 和 T_3 均位于第3层,但 T_4 、 T_3 的下游用户均有电话投诉信息,则故障位于同一层的开关与上一层的开关之间,即位于第2层开关和第3层(与 T_4 、 T_3 同一层)的开关之间,将2层开关任意组合,共有3种组合,分别为 (S_1, S_2) 、 (S_1, S_3) 、 (S_1, S_2, S_3) 。对比可疑故障区域库,可知故障区域为 (S_1, S_2, S_3) 。根据定位结果可知仅由电话投诉信息确定的故障区域为开关 S_1 、 S_2 和 S_3 包围的馈线段。

3 基于改进 D-S 证据理论的配电网故障定位结果决策融合

由2.3节已得出由断路器动作信息、故障指示器动作信息、配变报警动作信息等不同的故障信息确定的可疑故障设备集,在此基础上,采用D-S证据理论将可疑故障设备集进行融合分析,得到精确定位结果,确定故障设备。

D-S证据理论是一种有效的不确定性推理方法,它提供了证据合成的方法,能够融合多个证据源提供的证据,使决策结果更加精确。D-S证据理论的原理框图如图5所示。

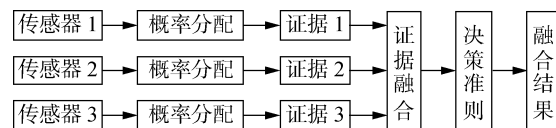


图5 D-S证据理论框图

Fig.5 Block diagram of D-S evidence theory

3.1 基本概率分配函数

定义:如果某一决策问题的所有可能结果用一个集合来表示,设为 Θ ,则 Θ 称为识别框架。本文所提到的辨识框架 Θ 都包含有限互斥的命题,即有 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_p\}$ 。如果幂集 2^Θ 上的基本概率赋值函数 m 定义为 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 。且其满足:

$$m(\emptyset) = 0 \quad (1)$$

$$\sum_{A_i \in \Theta} m(A_i) = 1 \quad (2)$$

则称 m 为框架 Θ 的基本可信度分配 BBA (Basic Belief Assignment) 函数。当 $A_i = \Theta$ 时, $m(\Theta)$ 表示 m 不知将概率分配给哪个命题,即证据认为每个命题都有可能,即将该部分概率分配给全集 Θ ; 当 A_i 为 Θ 的子集且 $m(A_i) > 0$ 时,称 A_i 为 m 的焦元。

3.2 D-S 证据理论组合规则

假设有 N 个信息源得到 N 条证据,它们的基本概率分配函数分别为 $m_1, m_2, \dots, m_N$ 。如果这 N 条证据相互独立,则可以将它们用以下公式进行融合:

$$M(A) = \begin{cases} 0 & A = \emptyset \\ \frac{1}{1 - k} \sum_{\cap A_i = A} \prod_{1 \leq j \leq N} m_j(A_i) & A \neq \emptyset \end{cases} \quad (3)$$

其中, $k = \sum_{\substack{A_i = \emptyset \\ 1 \leq i \leq N}} \prod m_j(A_i)$ 为证据之间的冲突系数,反映了证据之间的冲突程度, $k=1$ 时,证据之间矛盾, D-S 合成公式无法使用; $m_j(A_i)$ 为第 j 条证据对命题 A_i 分配的概率,即支持程度。

3.3 D-S 证据理论的改进

当证据之间不冲突时,通过证据理论融合后可以加强信任度高的目标的信任度。然而由于故障信息存在异常的可能,当故障信息发生异常时,可能使得到的证据与其他未发生异常的信息所得到的证据冲突,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不相符的结果。如当故障指示器信息得到的证据为:

$$M_1\{A_1, A_2\} = \{0.9, 0.1\}$$

而配变信息异常得到的证据为:

$$M_2\{A_2, A_3\} = \{0.1, 0.9\}$$

此时, $k = 0.9 \times 0.1 + 0.9 \times 0.9 + 0.1 \times 0.9 = 0.99$ 。利用 D-S 证据理论合成后的结果 $m(A_1) = m(A_3) = 0$ 、 $m(A_2) = 1$, 事实上故障指示器信息和配变信息都不支持 A_3 , 而融合后的证据却完全支持 A_3 , 这明显与两原始证据相悖。因此, 原始的证据理论无法解决证据冲突时的证据融合问题, 需要改进。

针对 D-S 证据理论存在的这些问题, 有些学者认为出现以上问题的原因是融合公式本身存在问题, 因此他们针对组合规则进行了改进^[14-15], 虽然一定程度上解决了以上问题, 但是改进的公式都大幅增加了计算量, 使得计算过程变得很复杂。还有一些学者认为是证据本身出现问题, 因此在融合前针对证据体做一定改进^[13]。本文采用针对证据体的修改进行证据融合。

由于证据体之间的冲突主要是证据体之间焦元无交集产生的, 若通过对证据体的修改, 使所有证据体中的焦元存在交集, 且不影响最终的决策结果即可解决 zadeh 悖论和一票否决的问题。因为全集 Θ 与所有焦元均有交集, 使所有证据体中都含有全集项 Θ 即可, 这里给所有证据体乘以相同的折扣率 $u(u < 1)$, 即:

$$\begin{aligned} M'(\{A'_1\}, \{A'_2\}, \dots, \{A'_n\}, \Theta') &= \\ uM(\{A'_1\}, \{A'_2\}, \dots, \{A'_n\}, \Theta) & \quad (4) \\ M'(\{A'_i\}) &= uM(\{A'_i\}) \\ M'(\Theta) &= 1 - \sum M'(\{A'_i\}) \end{aligned}$$

经过处理后所有的证据体的全集 Θ 的信任度均不为 0, 由于所有的证据都是乘以相同的折扣率, 因此融合结果中原来信任度最大的目标项的信任度依然最大, 仅在数值上稍有减小, 因此不会影响故障区域的决策。

3.4 D-S 证据理论的决策准则

将所有的证据融合得到新的证据后, 对得到的

新证据用以下准则进行决策得出最终故障区域:

a. 表示未知的 $m(\Theta)$ 值必须小于某一限值 θ , 即分配给全集 Θ 的值不能太大;

b. 判定的目标命题 A_i 的可信度 $m(A_i)$ 必须大于 $m(\Theta)$;

c. 判定的目标命题 A_i 的可信度 $m(A_i)$ 必须大于潜在目标命题可信度的平均值, 即 $m(A_i) > 1/s$, s 为融合后的证据中包含命题的个数。

3.5 基于 D-S 证据理论的配电网故障定位

D-S 证据理论用来融合多源信息, 这里是基于决策的融合, 融合过程如图 1 所示。将故障指示器、配变和电话投诉分别看作传感器, 由故障指示器信息、配变信息和电话投诉信息分别确定故障区域。例如由 2.3 节可知故障指示器信息确定的故障区域为 (S_1, S_2, S_3) 或 T_4 , 配变信息确定的故障区域为 (S_1, S_2, S_3) , 电话投诉信息确定的故障区域为 (S_1, S_2, S_3) 或 T_4 。将 (S_1, S_2, S_3) 设为 A_1 , T_4 设为 A_2 对故障区域内的元件进行概率分配, 由文献[15]可知某一地区配电网线路与变压器故障的概率呈一定的比例, 设该比例为 a , 当故障区域中含有线路和变压器时, 它们的概率按此比例分配, 概率分配完成后即得到 3 条证据分别为:

$$M_1\{A_1, A_2\} = \{a/(1+a), 1/(1+a)\}$$

$$M_2\{A_1\} = \{1\}$$

$$M_3\{A_1, A_2\} = \{a/(1+a), 1/(1+a)\}$$

然后利用式(4)修改原始证据体, 则改进后的证据为:

$$M'_1\{A_1, A_2, \Theta\} = \{ua/(1+a), u/(1+a), 1-u\}$$

$$M'_2\{A_1, \Theta\} = \{u, 1-u\}$$

$$M'_3\{A_1, A_2, \Theta\} = \{ua/(1+a), u/(1+a), 1-u\}$$

设 $a=5$ 、 $u=0.84$, 则:

$$M'_1\{A_1, A_2, \Theta\} = \{0.7, 0.14, 0.16\}$$

$$M'_2\{A_1, \Theta\} = \{0.84, 0.16\}$$

$$M'_3\{A_1, A_2, \Theta\} = \{0.7, 0.14, 0.16\}$$

然后利用式(3)对所得新的证据进行融合, 融合结果 $M\{A_1, A_2, \Theta\} = \{0.9808, 0.0137, 0.0085\}$ 。最后设定决策准则的限值 $\theta=0.1$, 因为 $m(A_1) > 0.1$ 且 $m(A_1) > 1/3$, 所以根据决策准则得到最终故障区域为 A_1 , 与实际情况一致。

4 实例分析

以图 2 为例对以下 6 种典型信息出现异常的情况分别进行分析。

a. 报警装置不完备, 信息不全, 这里假设 FI₃ 未安装。

b. 装置误动。典型的是故障指示器误动作, 这

里假定 FI_3 误动。

c. 信息漏报。假设某台配变没有上送报警信息,这里假定 T_3 没有报警。

d. 信息误报。假设某台配变发生误报警,这里假定为 T_5 ,因其并未停电,下游用户无报警。

e. 信息漏报。停电区域不止 1 台配变,但仅有 1 台配变有用户投诉。假设只有 T_4 上有用户投诉。

f. 缺少某一层信息,即没有用户电话投诉,但其他 2 层信息完备。

为了便于分析,将配电网作如下分区: A_0 (CB, S_1), A_1 (S_1, S_2, S_3), A_2 (S_3, S_4), A_3 (S_4, SL_4), A_4 (S_2, SL_1), A_5 (T_1), A_6 (T_2), A_7 (T_3), A_8 (T_4), A_9 (T_5), A_{10} (T_6), A_{11} (T_7)。因此证据理论的辨识框架为 $\Theta = \{A_1, A_2, \dots, A_{11}\}$ 。当如图 2 所示位置发生故障后,该区域线路与变压器的故障概率比值 $a = 5$, $u = 0.84$, $m(\Theta)$ 门限 θ 取 0.1。定位结果如表 1 所示。

表 1 6 种典型情况的融合结果

Table 1 Fusion results of six typical cases

情形	故障信息	证据	融合结果	决策结果
a	CB、 FI_1 、 T_3 及下游用户、 T_4 及下游用户	$M'_1 \{A_1, A_2, A_7, A_8, A_9, \Theta\} =$ $\{0.323\ 1, 0.323\ 1, 0.064\ 6, 0.064\ 6, 0.064\ 6, 0.16\}$ $M'_2 \{A_1, \Theta\} = \{0.84, 0.16\}$ $M'_3 \{A_1, \Theta\} = \{0.84, 0.16\}$	$M \{A_1, A_2, A_7, A_8, A_9, \Theta\} =$ $\{0.965\ 7, 0.016\ 7, 0.003\ 3, 0.003\ 3, 0.003\ 3, 0.008\ 3\}$	A_1
b	CB、 FI_1 、 FI_3 、 T_3 , T_3 下游用户、 T_4 , T_4 下游用户	$M'_1 \{A_2, A_9, \Theta\} = \{0.7, 0.14, 0.16\}$ $M'_2 \{A_1, \Theta\} = \{0.84, 0.16\}$ $M'_3 \{A_1, \Theta\} = \{0.84, 0.16\}$	$M \{A_1, A_2, A_9, \Theta\} =$ $\{0.859\ 0, 0.098\ 7, 0.019\ 7, 0.022\ 6\}$	A_1
c	CB、 FI_1 、 T_4 及 T_3 , T_4 下游用户	$M'_1 \{A_1, A_7, A_8, \Theta\} =$ $\{0.6, 0.12, 0.12, 0.16\}$ $M'_2 \{A_2, \Theta\} = \{0.84, 0.16\}$ $M'_3 \{A_1, \Theta\} = \{0.84, 0.16\}$	$M \{A_1, A_7, A_8, \Theta\} =$ $\{0.986\ 7, 0.004, 0.004, 0.005\ 3\}$	A_1
d	CB、 FI_1 、 T_4 、 T_3 、 T_5 、 T_4 下游用户、 T_3 下游用户	$M'_1 \{A_1, A_7, A_8, \Theta\} =$ $\{0.6, 0.12, 0.12, 0.16\}$ $M'_2 \{A_1, A_2, \Theta\} = \{0.42, 0.42, 0.16\}$ $M'_3 \{A_1, \Theta\} = \{0.84, 0.16\}$	$M \{A_1, A_7, A_8, \Theta\} =$ $\{0.954\ 1, 0.023\ 5, 0.006\ 7, 0.006\ 7, 0.008\ 9\}$	A_1
e	CB、 FI_1 、 T_3 、 T_4 及 T_4 下游用户	$M'_1 \{A_1, A_7, A_8, \Theta\} = \{0.6, 0.12, 0.12, 0.16\}$ $M'_2 \{A_1, \Theta\} = \{0.84, 0.16\}$ $M'_3 \{A_8, \Theta\} = \{0.84, 0.16\}$	$M \{A_1, A_7, A_8, \Theta\} =$ $\{0.710\ 4, 0.018\ 6, 0.246\ 1, 0.024\ 8\}$	A_1
f	CB、 FI_1 、 T_3 、 T_4	$M'_1 \{A_1, A_7, A_8, \Theta\} = \{0.6, 0.12, 0.12, 0.16\}$ $M'_2 \{A_1, \Theta\} = \{0.84, 0.16\}$	$M \{A_1, A_7, A_8, \Theta\} =$ $\{0.919\ 8, 0.024\ 0, 0.024\ 0, 0.032\ 1\}$	A_1

5 结语

本文根据配电网发生故障时得到的故障指示器信息、配变报警信息和人工电话投诉信息,分别建立网络树状图和可疑故障区域库,通过搜索网络树状图的结果与可疑故障区域库对比得出每类报警信息确定的故障区域,然后通过改进的 D-S 证据理论对每一类报警信息的决策结果进行融合得到最终的故障区域。该方法通过融合多源故障信息解决了仅依靠单源故障信息进行故障定位时可能因故障信息发生异常,尤其是不可识别异常而出现误判的问题,无论报警信息完备、信息不全、缺少某层信息或是信息

从表 1 可以看出,当报警装置不完备,信息不全时,仅根据故障指示器信息的定位结果为 A_1 、 A_2 、 A_7 、 A_8 或 A_9 ,而融合后的结果为 A_1 ;当 FI_3 误动时,仅根据故障指示器信息的定位结果为 A_2 或 A_9 ,而融合后的结果为 A_1 ;当配变 T_3 漏报时,仅根据故障指示器的定位结果为 A_1 、 A_7 、 A_8 ,而融合后的结果为 A_1 ;当 T_5 出现误报时,仅根据故障指示器的定位结果为 A_1 、 A_7 、 A_8 ,而融合后的结果为 A_1 ;当只有配变 T_4 上有用户投诉时,仅根据故障指示器的定位结果为 A_1 、 A_7 、 A_8 ,而融合后的结果为 A_1 ;当缺少电话投诉信息时,仅通过故障指示器信息的定位结果为 A_1 、 A_7 、 A_8 ,而融合后的结果为 A_1 。因此当仅依靠单源故障信息定位时,容易因故障信息发生异常而导致误判,而通过多源故障信息进行融合定位时可以提高故障定位的准确性和容错性,即使在情形 b 中信息出现不可识别异常时,定位结果依然准确。

错误,都能得到正确的结果,即使在只有一种故障信息的情况下仍然可以通过网络树状图进行故障定位,极大地提高了配电网故障定位的准确性和容错性,便于维修人员快速准确定位故障区段,加快抢修速度和提高供电可靠性。

参考文献:

- [1] 何正友. 配电网故障诊断[M]. 成都:西南交通大学出版社, 2011:1-9.
- [2] 刘健,董新洲,陈星莺. 配电网故障定位与供电恢复[M]. 北京:中国电力出版社,2012:1-8.
- [3] 刘建,倪建立,杜宇. 配电网故障区段判断和隔离的统一矩阵算法[J]. 电力系统自动化,1999,23(1):31-33.

- LIU Jian, NI Jianli, DU Yu. A unified matrix algorithm for fault section detection and isolation in distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(1): 31-33.
- [4] 梅念, 石东源, 杨增力, 等. 一种实用的复杂配电网故障定位的矩阵算法[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(10): 66-70.
- MEI Nian, SHI Dongyuan, YANG Zengli, et al. An applied matrix algorithm for fault location in power distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10): 66-70.
- [5] 黄佳乐, 杨冠鲁. 配电网故障区间定位的改进矩阵算法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(11): 41-45.
- HUANG Jiale, YANG Guanlu. Modified matrix algorithm for fault section location of distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(11): 41-45.
- [6] 卫志农, 何焯, 郑玉平. 配电网故障区间定位的高级遗传算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(4): 127-130.
- WEI Zhinong, HE Ye, ZHENG Yuping. A refined genetic algorithm for the fault sections location[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(4): 127-130.
- [7] 郭壮志, 陈波, 刘灿萍, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位[J]. 电网技术, 2007, 31(11): 88-92.
- GUO Zhuangzhi, CHEN Bo, LIU Canping, et al. Fault location of distribution network based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2007, 31(11): 88-92.
- [8] 郑涛, 潘玉美, 郭昆亚, 等. 基于免疫算法的配电网故障定位方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 77-83.
- ZHENG Tao, PAN Yumei, GUO Kunya, et al. Fault location of distribution network based on immune algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 77-83.
- [9] 王英英, 罗毅, 涂光瑜. 基于贝叶斯公式的似然比形式的配电网故障定位方法[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 54-57.
- WANG Yingying, LUO Yi, TU Guangyu. Fault location based on Bayes probability likelihood ratio for distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 54-57.
- [10] 陈歆技, 丁同奎, 张钊. 蚁群算法在配电网故障定位中的应用[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 74-77.
- CHEN Xinji, DING Tongkui, ZHANG Zhao. Ant colony algorithm for solving fault location in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(5): 74-77.
- [11] 张颖, 周韧, 钟凯. 改进蚁群算法在复杂配电网故障区段定位中的应用[J]. 电网技术, 2011, 35(1): 224-228.
- ZHANG Ying, ZHOU Ren, ZHONG Kai. Application of improved ant colony algorithm in fault-section location of complex distribution network[J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 224-228.
- [12] 束洪春, 王晶, 葛耀中. 基于故障投诉电话信息的配电网故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(11): 39-41.
- SHU Hongchun, WANG Jing, GE Yaozhong. Study of fault location based on trouble calls for distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(11): 39-41.
- [13] 郭创新, 高振兴, 刘毅, 等. 采用分层多源信息融合的电网故障诊断方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2976-2983.
- GUO Chuangxin, GAO Zhenxing, LIU Yi, et al. Hierarchical fault diagnosis approach for power grid with information fusion using multi-data resources[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2976-2983.
- [14] DENOUEX T. Conjunctive and disjunctive combination of belief functions induced by non-distinct bodies of evidence[J]. Artificial Intelligence, 2008, 172(2/3): 234-264.
- [15] 肖文, 王正友, 王耀德. 一种相关证据的合成规则[J]. 控制与决策, 2011, 26(5): 773-776.
- XIAO Wen, WANG Zhengyou, WANG Yaode. Combination rule for dependent evidences[J]. Control and Decision, 2011, 26(5): 773-776.

作者简介:



高湛军

高湛军(1974—),男,山东济南人,副教授,博士,通信作者,研究方向为继电保护和电力系统故障诊断(E-mail: 14513188@qq.com);

李思远(1992—),男,山东济南人,硕士研究生,研究方向为继电保护、电力系统故障诊断(E-mail: dereklsy@163.com);

彭正良(1988—),男,山东济南人,硕士,研究方向为配电网故障诊断(E-mail: 329929122@qq.com)。

Fault location method of distribution network based on tree structure diagram and improved D-S evidence theory

GAO Zhanjun¹, LI Siyuan¹, PENG Zhengliang², ZHAO Yao¹

(1. Key Laboratory of Power System Intelligent Dispatch and Control, Ministry of Education, Shandong University, Ji'nan 250061, China; 2. Integrated Electronic Systems Lab Co., Ltd., Ji'nan 250100, China)

Abstract: Aiming at the problem that the fault information of distribution network may be abnormal, especially the unrecognizable abnormality may lead to misjudgment, a novel fault location method of distribution network based on tree structure diagram and D-S evidence theory is proposed, which uses the multi-source information to locate the fault, avoiding the misjudgment caused by abnormal single-source information. Firstly, a novel searching algorithm based on tree structure diagram is proposed, which respectively uses the fault indicator information, distribution transformer alarm information and telephone complaints information to form a tree structure diagram, and preliminarily locates the fault by searching the tree structure diagrams. Then the improved D-S evidence theory is adopted to fuse fault locate results of each fault information to obtain the final location results. Results of case study verify that the proposed method is feasible and effective, and can solve the fault location problem caused by unrecognizable abnormality.

Key words: distribution network; electric fault location; tree structure diagram; D-S evidence theory; information fusion