

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201103

基于网络树状图的低压配电网故障研判仿真分析

魏然¹, 张磐², 高强伟¹, 黄福泉³, 朱聪³, 孙伟卿³

(1. 国网天津市电力公司城东供电分公司, 天津 300250; 2. 国网天津市电力公司电力科学研究院, 天津 300384;
3. 上海理工大学机械工程学院, 上海 200093)

摘要: 智能化设备在低压配电网中的普及, 为实现低压配电网故障的实时研判与主动抢修提供了新的研究方向。首先分析故障研判的信息来源及其校验方法, 利用树状图描述低压台区的拓扑结构, 并以此为基础提出主动故障研判的流程。然后运用模糊集理论分析部分设备运行状态信息缺失时的故障研判。最后基于 PSCAD 搭建涵盖中压馈线、低压配变、低压分支箱、终端用户等关键环节的仿真模型, 根据研判流程设计控制模块, 通过仿真结果验证该方案的可行性和有效性。

关键词: 低压配电网; 故障研判; 网络树状图; 模糊集; PSCAD

Simulation analysis of low-voltage distribution network fault diagnosis based on tree structure diagram

WEI Ran¹, ZHANG Pan², GAO Qiangwei¹, HUANG Fuquan³, ZHU Cong³, SUN Weiqing³

(1. Chengdong Power Supply Branch, State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300250, China;
2. State Grid Tianjin Electric Power Research Institute, Tianjin 300384, China; 3. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: The popularization of intelligent equipment in the low-voltage distribution network provides a new research direction for real-time diagnosis and initiative rush repair of low-voltage distribution network faults. First, the information source of fault diagnosis and verification method are analyzed. Secondly, tree structure diagram is used to describe the topological structure of the low-voltage courts. And an active fault diagnosis process is proposed. Then, the fuzzy set theory is used when some equipment running state information is missing. Finally, based on PSCAD, the simulation model including the key links such as medium-voltage feeder, low-voltage distribution transformer, low-voltage branch box and end-user is built. The control module is designed according to the research process, and the feasibility and effectiveness of the scheme are verified through simulation results.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. KJ19-1-11).

Key words: low-voltage distribution network; fault diagnosis; tree structure diagram; fuzzy set theory; PSCAD

0 引言

智能电网的深入建设对配电网供电可靠性的要求不断提高^[1], 而低压配电网作为配电网的末端环节, 直接影响到用户的生产生活。然而目前低压配电网故障率高, 自动化程度不足, 故障快速处理能力欠缺^[2-3]。传统低压配电网发生停电故障, 供电公司往往无法及时得知停电信息, 只能在客户报修后开展抢修工作, 存在被动等待、处理效率低、客户

投诉风险大和安全隐患多等问题^[4]。因此为提高配电网故障抢修业务的时效性, 确保抢修质量和效率, 提高供电服务水平, 有必要开展低压配电网故障主动研判研究。

目前配电网故障定位主要的研究方法包括行波法^[5-6]、基于微扰法的定位方法^[7]、基于阻抗的定位方法^[8-9]、基于信号注入的方法等^[10-11]。除了传统的求解方法, 常用的求解算法还包括粒子群算法^[12]、遗传算法^[13]、蚁群算法^[14-15]、果蝇优化算法^[16]等人工智能算法。然而这些方法适用于中压配电网馈线层面的故障定位, 以低压台区为单元的低压配电网

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(KJ19-1-11)

线路复杂，这些方法难以直接运用，因而也有许多学者针对低压配电网的故障研判展开研究。文献[17]在调度运行管理系统与其他系统多源数据共享的基础上，根据配电网实时状态进行故障研判。文献[18]考虑了分布式电源接入使得配电网存在部分线路多电源供电的情况，提出了一种新的方向判别元件，准确区分正、反方向故障。文献[19]确定了故障研判的技术原则，分析构建了研判策略的技术支持系统架构并提出了一种基于分层拓扑模型的故障研判流程。上述文献都侧重于研判系统软件开发的关键实现技术和整体系统构架，缺乏对具体研判逻辑的分析。随着智能化设备在配电网中的普及，利用智能配变终端、智能电表等信息进行低压配电网故障研判的研究也随之兴起^[20-22]。然而由于智能设备质量、信息传递过程存在干扰以及部分低压台区设备较为落后等问题，使得有些地区的部分低压设备运行状态信息无法被有效召测，从而影响研判系统正常进行故障研判。因此有必要考虑部分设备运行状态缺失的情况，开展低压配电网主动故障研判的研究。

首先讨论故障研判的信息来源及校验方法；其次利用树状图描述低压配电网的网络拓扑，提出基于网络树状图的故障研判流程；然后运用模糊集理论分析部分设备运行状态缺失的故障研判方法；最后基于 PSCAD 软件搭建涵盖中压馈线，低压配变、低压分支箱、终端用户等关键节点的仿真模型，根据研判流程设计故障研判控制模块进行仿真分析，验证该方法的可行性和有效性。

1 研判信息来源及校验方法

配电网主动故障研判的信息来源包括配网自动化系统、调度自动化系统、用电信息采集系统、配电线路在线监测系统、剩余电流动作保护监测系统、营配贯通平台、生产管理系统、95598 系统八个方面^[23]。具体如表 1 所示。

表 1 各系统提供的信息

Table 1 Information provided by each system

系统	信息
配电自动化系统	开关变位及故障跳闸
调度自动化系统	开关事故分闸警告及保护动作
用电信息采集系统	配变、电表运行状态
配电线路在线检测系统	故障指示器短路、接地等警告
剩余电流动作保护监测系统	总保闭锁等警告
营配贯通平台	配变对应的用户结构化地址
生产管理系统	中低压配电网相关设备参数、网络拓扑关系、计划停电及故障停电
95598 系统	用户报修

低压台区是基于低压配变-低压开关组合-线路途径-终端用户的模式，可通过召测关键节点的信息逐级校验分支线及更高等级线路故障、配变故障、低压分支箱故障、用户侧电表故障等信息的准确性。具体方法如下：分支线开关跳闸信息需要召测该分支线下所有配变的停电告警信息进行校验；配变停电告警信息需要召测该配变下的所有低压分支箱或者多个代表性用户智能电表的运行状态信息进行校验；低压分支箱故障信息需要召测该分支箱下多个智能电表的运行状态信息进行校验；用户侧电表故障信息需要召测电表的电压、电流进行校验，若电表有电压无电流，则判定故障为用户内部故障或者欠费停电。

2 基于网络树状图的故障研判

2.1 低压台区网络树状图

网络树状图具有良好的扩展性，因此适合用来描述结构复杂的低压配电网。本文在建立网络树状图时将线路、配变、低压分支箱和用户作为节点，开关设备作为连接线。在低压台区的树状图中，采用分层的方式表示辐射状的网络拓扑及设备位置。基本思路为：以馈线段为起始点沿着功率流动的方向搜索，当搜索到一个开关时则将这个开关表示为第 i 层连接线，然后再以该开关下的线路或设备节点为新的起始点搜索与该节点相连的分支，找到新的开关时则将该开关表示为第 $i+1$ 层连接线，重复上述过程遍历整个低压台区，最终止于用户节点。如图 1 所示的低压台区对应于图 2 所示的网络树状图。其中实心矩形表示常闭开关，空心矩形表示常开的联络开关。K1 为分支线开关，K2、K3 为配变高压侧进线开关，K4 为配变低压侧出线开关，K5、K6 为分支箱进线开关，K7—K11 为与用户侧电表对应的开关。

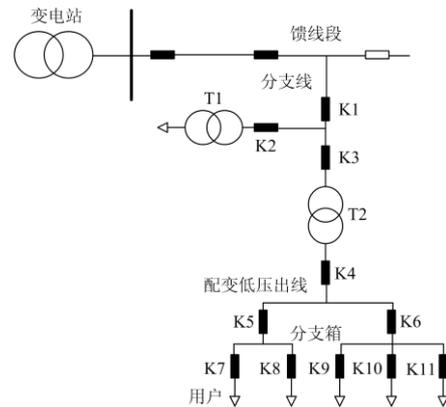


图 1 低压台区

Fig. 1 Low-voltage courts

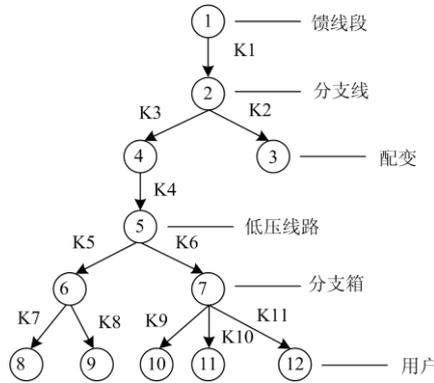


图 2 低压台区网络树状图

Fig. 2 Tree structure diagram of low-voltage courts

图 2 中, 起始节点为馈线主干线, 第二层节点为从馈线段引出的分支线, 本例只有一条分支线, 存在多条分支线时, 用集合 $A = \{a_1, a_2, \dots, a_n\}$ 表示。以下各层节点上的设备也可以用集合分别表示, 可见每一个子节点的集合都对应上层的一个父节点。定义每层节点对应设备的运行状态信息列表 $N = [n_1, n_2, \dots, n_n]$, 若召测第 i 个设备的运行状态信息为停电, 则 $n_i = 0$, 否则 $n_i = 1$ 。可以通过树状图上下节点的关系对停电信息进行验证。假设某个父节点 x_k 的运行信息为 n_{xk} , 其子节点的集合为 Y 对应的运行状态信息列表为 $N_y = [n_{y1}, n_{y2}, \dots, n_{ym}]$, 则可以根据式(1)校验 n_{xk} 。

$$n_{xk} = \begin{cases} 1 & \sum_{i=1}^n n_{yi} > 0 \\ 0 & \sum_{i=1}^n n_{yi} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

2.2 研判流程

同一时间段的某处故障可能会触发多个停电警告信息, 若同时收到了多个警告信息则根据对应树状图, 选出最上层警告信息的设备, 依次往下进行故障研判。进行研判前应该先根据停电警告信息设备所在的节点层, 由上往下召测子节点集合的运行状态信息列表进行验证, 再由下往上追溯至其父节点, 逐层进行故障研判。例如图 2 中当节点 6 低压分支箱失电时, 首先通过用电信息采集系统召测子节点用户电表的运行信息, 确认失电信息无误后则召测父节点 5 低压线路的运行状态。当节点 5 的运行状态为 1 表示正常运行时, 则研判结果为节点 6 低压分支箱故障, 否则继续向上一级追溯。其中分支线或者馈线的运行状态可以通过配电自动化系统、调度自动化系统中开关的跳闸进行判断。具体流程如图 3 所示。

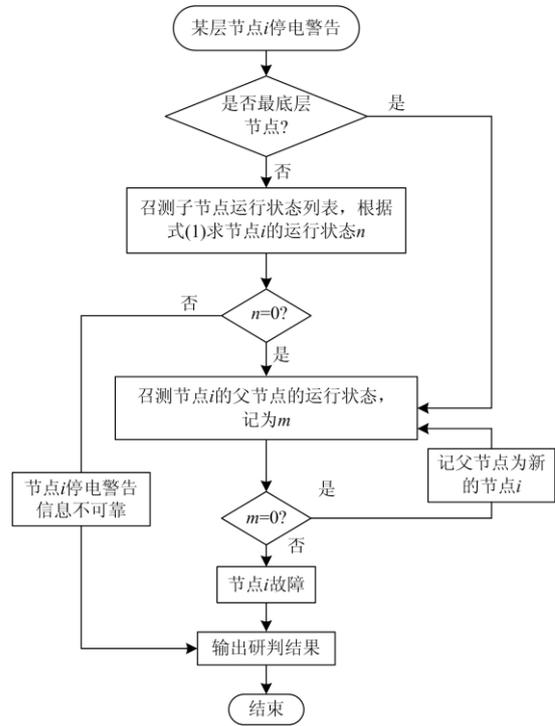


图 3 研判流程

Fig. 3 Diagnosis process

3 设备运行状态未知时的故障研判

由于设备质量参差不齐及信号干扰等各种实际问题, 可能导致部分设备的运行状态无法被召测, 使得正常的研判流程无法顺利进行, 本文利用模糊集理论处理该种情况下的故障研判。所谓模糊集就是以隶属度函数来表征变量的不确定特征, 隶属度函数量化了元素属于该变量的程度^[24]。当收到停电警告信息时, 如果在网络树状图中某些层节点设备的运行状态信息未知, 则可按照式(2)求状态未知设备的故障隶属度。

$$F(x_i) = \omega_i / \sum_{i=1}^n \omega_i \quad (2)$$

式中: $F(x_i)$ 为设备 x_i 故障的隶属度; ω_i 为权重系数; i 为节点设备所在层; n 为停电警告节点所在层。

其中 ω_i 为

$$\omega_i = 1 + 0.1i \quad (3)$$

需要注意的是式(2)中 n 和 i 是仅包含运行状态未知设备所在层数, 并不包含可以通过召测而确定运行状态设备所在层数, 因为这些设备的状态是确定的不需要通过不确定性的方法分析。当收到某层节点的停电警告信息, 一般认为该节点的父节点设备发生故障的几率较大。因此在式(3)中, 越靠近故障信息所在层的设备的权重系数越大。同时由于下

层设备故障不会导致上层设备失电，因此 n 层以后的节点不必考虑。

如果同时收到多个设备的停电警告信息，可以按式(2)分别计算其可能故障区域内各设备发生故障的隶属度，然后按式(4)计算多个停电警告关联设备的总隶属度。

$$F_{m \cup n}(x_i) = F_m(x_i) + F_n(x_i) - F_m(x_i)F_n(x_i) \quad (4)$$

式中： $F_{m \cup n}(x_i)$ 为收到第 m 个和第 n 个停电警告后设备 x_i 的总隶属度； $F_m(x_i)$ 为收到第 m 个停电警告后设备 x_i 的隶属度。

计算完故障区域内所有运行状态未知设备的隶属度后，按照隶属度的大小对可能故障的设备进行排序，隶属度最大的设备即为该区域内故障概率最大的设备。可以设定适当的隶属度阈值，当某设备的隶属度超过阈值时即认为该设备发生故障。

4 模型搭建

基于 PSCAD 搭建仿真模型，如图 4 所示，10 kV 部分由两条多分段、手拉手接线结构的馈线组成，馈线段 TLine_2 经分支线后的网络拓扑则同图 1。电源电压及频率分别设置为 110 kV、50 Hz，

模拟配电网的上一电压等级电源。然后经过三相双绕组变压器后电压降为 10 kV，再由断路器连接至母线。两条馈线由联络开关 B4 连接，馈线由分段开关分为两分段，各馈线段接有 10 kV/0.4 kV 的低压配变。馈线段 TLine_2 经分支线开关 B8 后连接有 T1、T2 两台低压配变，T2 低压侧出线又经过低压分支箱后连接至各用户。其中开关需要搭配 Timed Breaker Logic 组件设置其初始状态，各馈线段采用 Frequent Dependent(Phase)模型、100 km 长度、3Conductor Flat Tower 结构的架空线、负荷则采用 Fixed Load 综合固定类负载。

仿真以配变 T2 的低压出线处发生短路故障为例模拟故障研判，如图 3 中由 Logic Fault Timed 组件控制的接地故障模块，在短路故障发生时由开关 K4 将该故障切除。利用 Breakout、Ammeter 组件获取开关的单相电流，数据采集则只需要通过 Data Label 组件即可实现。

当发生短路故障，检测到过电流后，上一级开关跳闸将故障切除。如图 4 中当故障发生时，检测到电流 I_4 超过整定值，开关 K4 自动跳闸。其控制过程如图 5 所示。

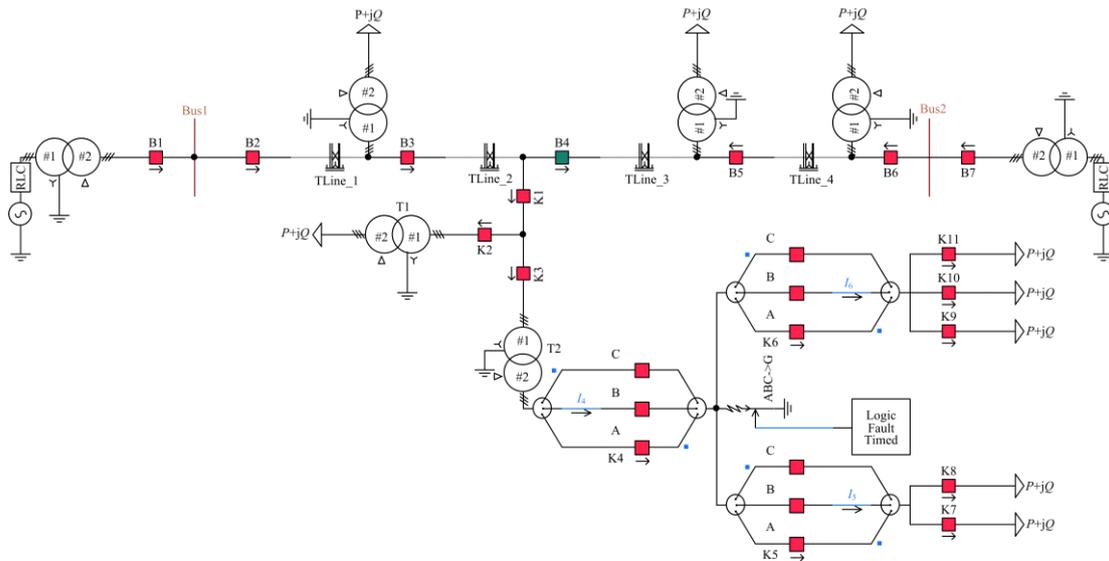


图 4 仿真模型
Fig. 4 Simulation model

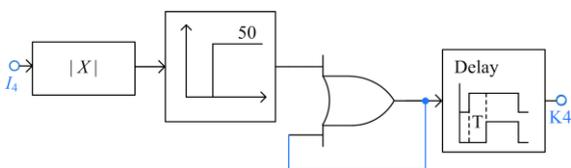


图 5 故障隔离控制模块
Fig. 5 Fault isolation control module

将电流 I_4 进行绝对值处理后送入过流检测器，当电流大于预设值时过流检测器输出 1，经过自保持电路后再延时 0.02 s 送给开关 K4，模拟开关的动作时间。过流检测器的预设值定为正常电流 1.2 倍。开关的控制逻辑是 0=ON(closed)、1=OFF(open)。二元延迟 Binary ON Delay 的主要作用是若输入变高，在经过指定的延迟时间后，若输入还保持高位的话，

则输出就变高。

收到停电警告信息后研判系统将主动进行故障研判, 根据第二部分所述的研判流程, 配变低压侧出线故障的控制模块如图 6 所示。

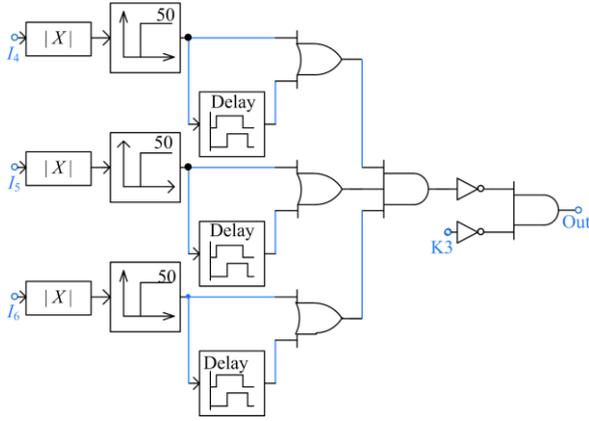


图 6 研判控制模块

Fig. 6 Diagnosis control module

当开关跳闸后, 检测装置检测到电流为零, 研判系统将基于这些变为零的信号进行研判。然而由于电流存在自然过零点, 会导致检测装置误以为电流为零, 因此有必要对两者进行区别。以电流 I_4 为例, 将实时电流 I_4 进行绝对值处理后送入过流检测器, 当电流大于一定值时则认为该电流不为零, 过流检测器输出 1 送入或门的一个输入端。同时将过流检测器的输出经过一定延时后输入或门的另一个输入端。其目的是将电流 I_4 某一时刻的检测值与另一时刻的检测值输入或门, 只有当两个时刻的电流都为零, 或门输出 0, 表示检测到电流为零, 否则不为零, 由此躲过对电流自然过零点的误检测。当频率为 50 Hz 时, 一个完整波形的周期为 0.02 s, 经过调试该延时时间设置为四分之一周期 0.005 s 时效果较好。

当检测到 I_4 电流为零时, 需召测其子节点的运行状态进行信息验证, 当 I_5 、 I_6 的电流也为零时表示信息无误。三输入与门输出为 0, 经过非门后将 1 作为两输入与门一端的输入。然后需要召测其父节点也就是配变 T2 的运行状态, 这里直接用开关 K3 表示 T2 的状态, 开关闭合时即表示配变未失电。开关 K3 的状态经非门后输入与门的另一端, 则此时与门的输出 Out 为 1, 表示配变低压侧出线发生了故障。

5 结果分析

为全面分析各种情况下的故障研判, 设置了两个场景, 场景一为低压台区各设备的运行状态都能

被有效检测, 利用三相短路故障模拟配变低压侧出线故障的研判, 设置仿真时间为 0.3 s, 计算步长为 0.1 μ s, 绘图步长为 10 μ s, 故障发生时间设置在 0.1 s。场景二为只能检测到配变的运行状态和末端用户是否停电, 中间低压设备的运行状态未知。

场景一的仿真结果如图 7、图 8 所示。

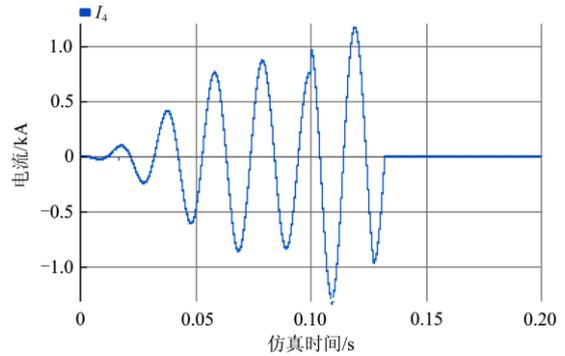


图 7 故障电流

Fig. 7 Fault current

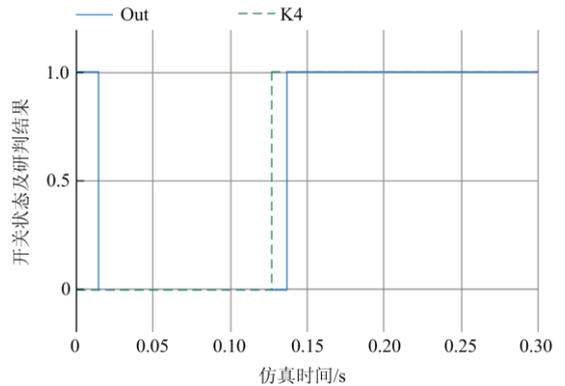


图 8 研判结果

Fig. 8 Diagnosis result

如图所示, I_4 为流过开关 K4 的电流, 在 0.1 s 时配变低压侧出线发生短路故障 I_4 增大。当其值超过过流检测器的预设值时, 经过 0.02 s 开关 K4 动作, 其状态信号变为 1, 将切除故障, I_4 开始衰减。随后触发配变低压侧出线故障研判模块, 输出 Out 为 1, 表明配变低压侧出线发生故障。研判结果输出会比开关跳闸时间晚大概 0.01 s, 这时因为从开关跳闸开始电流衰减为零需要一定的时间。

场景二部分设备运行状态未知则设置了三种情况, 如图 2 所示: a) 节点 8 用户失电, 节点 4 配变正常运行, 其余节点运行状态未知; b) 节点 8、9 用户失电, 节点 4 配变正常运行, 其余节点运行状态未知; c) 节点 8-12 用户失电, 节点 4 配变正常运行, 其余节点运行状态未知。为方便描述以父、子

节点之间的连线开关表示子节点的运行状态，开关跳闸时即表示失电。根据模糊集理论计算各种情况下各开关跳闸的概率如表 2 所示。

表 2 开关跳闸概率

Table 2 Switch trip probability

场景	关联开关	各开关跳闸概率	可能跳闸事件及概率	概率最大的跳闸事件
a	K7	0.527	K7:0.527	K7
	K5	0.324	K5:0.324	
	K4	0.149	K4:0.149	
b	K7-K8	0.527	K7-K8:0.278	K5
	K5	0.543	K5:0.543	
	K4	0.276	K4:0.276	
c	K7-K11	0.527	K7-K11:0.041	K4
	K5、K6	0.543、0.691	K5-K6:0.375	
	K4	0.554	K4:0.554	

场景 a 只检测到节点 8 用户失电，则此时最可能跳闸的开关为 K7。场景 b 检测到节点 8、9 用电，此时开关 K5 跳闸的概率 0.543，比 K7、K8 同时跳闸的概率 0.278 大，即节点 6 分支箱故障的概率更大。其中由于开关 K7、K8 并没有联系，因此认为它们的开关跳闸是独立事件，以下同理。场景 c 检测到所有用户均失电，此时与这些用户均有联系的开关 K4 的跳闸概率最大。可以发现，当检测到的失电用户数量不同时，计算结果也不一样。获取越多的用户失电信息将使结果更加准确，因此实际中可结合 95598 系统的故障投诉电话信息加以运用。

6 结论

本文分析了低压配电网故障研判的信息来源及校验方法；利用网络树状图描述低压配电网的拓扑结构，并基于此提出了低压配电网的故障研判流程；同时利用模糊集理论处理当部分设备的运行状态缺失时的故障研判。仿真结果表明该方法能够快速精确地进行故障研判，提高了低压配电网故障的处理效率。

参考文献

[1] 黄建勇, 孟琦斌, 吴顺超, 等. 基于属性数学的配电网运行状态评估[J]. 中国电力, 2019, 52(2): 104-110, 118. HUANG Jianyong, MENG Qibin, WU Shunchao, et al. Operation state evaluation of distribution network based on attribute mathematics[J]. Electric Power, 2019, 52(2): 104-110, 118.

[2] 程云祥, 李阳, 卢芳, 等. 多源信息辅助分区的主动配电网故障区段定位[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 147-154.

CHENG Yunxiang, LI Yang, LU Fang, et al. Fault-section location for active distribution networks assisted by multi-source information[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 147-154.

[3] 葛维春, 张硕, 张艳军, 等. 基于 μ PMU 同步量测数据的配电网故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(4): 39-46. GE Weichun, ZHANG Shuo, ZHANG Yanjun, et al. A novel method for fault location of distribution network based on μ PMU synchronized measurement data[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(4): 39-46.

[4] 姚强, 马群, 慕锟, 等. 基于采集系统停电信息的配电网主动抢修的实现[J]. 吉林电力, 2019, 47(1): 5-6, 56. YAO Qiang, MA Qun, MU Kun, et al. Realization of initiative repair of power distribution network based on power failure information for power user electric energy data acquire system[J]. Jilin Electric Power, 2019, 47(1): 5-6, 56.

[5] 邓丰, 李欣然, 曾祥君, 等. 基于多端故障行波时差的含分布式电源配电网故障定位新方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640. DENG Feng, LI Xinran, ZENG Xiangjun, et al. A novel multi-terminal fault location method based on traveling wave time difference for radial distribution systems with distributed generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(15): 4399-4409, 4640.

[6] 陈志伟, 舒勤. 基于小波包变换的混联配电网故障定位方法[J]. 广东电力, 2019, 32(1): 100-108. CHEN Zhiwei, SHU Qin. Fault location method for hybrid distribution network based on wavelet transformation[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(1): 100-108.

[7] 柴鹏, 周灏, 张煜, 等. 基于双端行波法的电缆线路短路故障定位改进[J]. 中国电力, 2020, 53(11): 168-174. CHAI Peng, ZHOU Hao, ZHANG Yu, et al. Short-circuit fault location for power cables based on improved two-terminal traveling wave method[J]. Electric Power, 2020, 53(11): 168-174.

[8] RAMAR K, ENG E N. Generalized impedance-based fault location for distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(1): 449-451.

[9] MORA-FLÒ REZ J, MELÉ NDEZ J, CARRILLO-CAICEDO G. Comparison of impedance based fault location methods for power distribution systems[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(4): 657-666.

[10] 鲍小峰, 肖开伟, 杨隽, 等. 基于主动注入信号法的单相接地故障定位方法[J]. 电工技术, 2018(17): 135-137. BAO Xiaofeng, XIAO Kaiwei, YANG Jun, et al. Single-phase grounding fault location method based on active

- signal injection method[J]. *Electrical Technology*, 2018(17): 135-137.
- [11] 齐郑, 庄舒仪, 刘自发, 等. 基于并联电阻扰动信号的配电网故障定位方法分析[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(9): 195-200.
QI Zheng, ZHUANG Shuyi, LIU Zifa, et al. Fault location method analysis of distribution network based on shunt resistance disturbance signal[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(9): 195-200.
- [12] 赵乔, 王增平, 董文娜, 等. 基于免疫二进制粒子群优化算法的配电网故障定位方法研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(20): 83-89.
ZHAO Qiao, WANG Zengping, DONG Wenna, et al. Research on fault location in a distribution network based on an immune binary particle swarm algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(20): 83-89.
- [13] 严太山, 崔杜武, 陶永芹. 基于改进遗传算法的配电网故障定位[J]. *高电压技术*, 2009, 35(2): 255-259.
YAN Taishan, CUI Duwu, TAO Yongqin. Fault location for distribution network by improved genetic algorithm[J]. *High Voltage Engineering*, 2009, 35(2): 255-259.
- [14] 刘迅, 黄纯. 蚁群算法在超高压输电线路故障测距的应用[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2012, 24(5): 132-137.
LIU Xun, HUANG Chun. Fault location for EHV transmission line based on ant colony algorithm[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2012, 24(5): 132-137.
- [15] 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.
- [16] 王巍璋, 王淳, 敖鑫. 基于果蝇优化算法的配电网故障定位[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(18): 108-114.
WANG Weizhang, WANG Chun, AO Xin. Fault location of power distribution network based on fruit fly optimization algorithm[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(18): 108-114.
- [17] 张远来, 易文韬, 樊启俊, 等. 基于调度运行管理系统的配电网故障研判方案[J]. *电力系统自动化*, 2015, 39(1): 220-225.
ZHANG Yuanlai, YI Wentao, FAN Qijun, et al. Distribution network fault analysis scheme based on dispatching operation management system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2015, 39(1): 220-225.
- [18] 朱逸凡, 赵宏程, 陈争光, 等. 适用于逆变型电源接入的配电网故障方向判别元件[J]. *中国电力*, 2019, 52(5): 76-82.
ZHU Yifan, ZHAO Hongcheng, CHEN Zhengguang, et al. Fault direction discriminating element used for the distribution network with IIG integration[J]. *Electric Power*, 2019, 52(5): 76-82.
- [19] 游大宁, 瞿寒冰, 霍健, 等. 配网抢修指挥故障研判策略研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(13): 84-91.
YOU Daning, QU Hanbing, HUO Jian, et al. Research on fault analysis and identification strategy for distribution network[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(13): 84-91.
- [20] HE Y, JENKINS N, WU J. Smart metering for outage management of electric power distribution networks[J]. *Energy Procedia*, 2016, 103: 159-164.
- [21] JIANG Y, LIU C, DIEDESCH M, et al. Outage management of distribution systems incorporating information from smart meters[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2016, 31(5): 4144-4154.
- [22] 张航, 王振岳, 陈星. 基于智能电表的低压电网故障预判系统[J]. *华电技术*, 2019, 41(2): 14-17.
ZHANG Hang, WANG Zhenyue, CHEN Xing. Fault prediction system for low voltage power grid based on smart meters[J]. *Huadian Technology*, 2019, 41(2): 14-17.
- [23] 姚瑛, 郗晓光, 高世伟, 等. 采用多数据源的配电网故障研判技术[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2017, 29(2): 50-55.
YAO Ying, XI Xiaoguang, GAO Shiwei, et al. Fault diagnosis of distribution network based on multiple data sources[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2017, 29(2): 50-55.
- [24] 张立波, 程浩忠, 曾平良, 等. 基于不确定理论的输电规划[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(16): 159-167.
ZHAO Libo, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. Transmission network planning approaches based on uncertainty theories[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(16): 159-167.

收稿日期: 2020-09-09; 修回日期: 2020-12-30

作者简介:

魏然(1976—), 男, 本科, 研究方向为智能配电网; E-mail: ran.wei@tj.sgcc.com.cn

张磐(1983—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网和智能变电站技术; E-mail: pan.zhang@tj.sgcc.com.cn

高强伟(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网。E-mail: qiangwei.gao@tj.sgcc.com.cn

(编辑 张爱琴)