

DOI: 10.7667/PSPC170862

配网抢修指挥故障研判策略研究

游大宁¹, 瞿寒冰², 霍健², 朱英刚³, 彭克⁴, 谭苏君²

(1. 国网山东省电力公司, 山东 济南 250001; 2. 国网济南供电公司, 山东 济南 250012;
3. 积成电子股份有限公司, 山东 济南 250104; 4. 山东理工大学, 山东 淄博 255049)

摘要: 随着配网抢修指挥业务规范化水平的不断提升, 有效的配网故障研判策略对于提升故障抢修效率具有重要作用。确定了配网故障研判的技术原则, 分析构建了实现配网故障研判策略的技术支持系统架构。综合客户失电、低压线路失电、配变失电、分支线失电、主干线失电 5 个层次的故障研判逻辑, 提出一种基于分层拓扑模型的配电网故障研判流程。实际案例的分析结果证明了所提策略流程的有效性。

关键词: 配网; 抢修指挥; 故障研判; 技术支持系统; 分层拓扑模型

Research on fault analysis and identification strategy for distribution network

YOU Daning¹, QU Hanbing², HUO Jian², ZHU Yinggang³, PENG Ke⁴, TAN Sujun²

(1. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China; 2. State Grid Jinan Power Supply Company, Jinan 250012, China; 3. Integrated Electronic Systems Lab Co., Ltd., Jinan 250104, China;
4. Shandong University of Technology, Zibo 255049, China)

Abstract: With the continuous improvement of distribution network emergency repair command business, valid distribution network fault analysis and identification strategy is important to improve the efficiency of fault emergency repair. This paper defines the technical principle of distribution network fault analysis and identification. The architecture of technical support system based on the distribution network fault analysis strategy is established. The fault identification strategy for distribution network based on layering topology model is proposed, including the customer fault, low-voltage line fault, distribution transformer fault, branch-line fault and main-line fault. The practical cases prove the validity of proposed fault analysis and identification strategy.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFB0901303).

Key words: distribution network; emergency repair command; fault analysis and identification; technical support system; layering topology model

0 引言

当前社会经济的快速发展对供电可靠性要求越来越高, 有效的配网故障研判对于提升抢修效率和恢复供电速度具有重要意义^[1]。目前基于配电自动化系统针对 10 kV 主干线路的故障研判策略已经比较成熟^[2-6]。而针对低压配网的故障定位与研判仍主要依赖于人工经验, 准确性差, 效率低, 部分已建成的配网故障研判技术支持系统研判手段单一、逻辑

简单, 难以有效实现配网故障的综合指挥研判。随着配网抢修指挥业务规范化水平的不断提升, 有效的配网故障研判策略对于提升配网故障研判准确性和抢修指挥效率具有至关重要的作用。

目前许多学者针对低压配网的故障研判策略进行了大量研究。文献[7-11]通过分析多维数据信息, 研究了配网故障定位方法与研判策略。文献[12-13]依托地理信息系统, 分别研究了配网抢修的信息融合技术和配网生产抢修指挥平台的建设体系。文献[14]开发了一套配电网故障研判搜索定位系统, 能实现故障设备的快速检索定位和故障原因的快速研判。文献[15-18]则综合利用 PMS、GIS、EMS 等多系统信息, 提出相应的配网抢修指挥技术支持系统。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2016YFB0901303); 山东省技术创新项目资助(201721901062); 国网山东省电力公司科技项目资助(A101-300009250-00020)

上述研究对低压配网的故障定位和抢修指挥提供了大量有效的技术方案, 但是大多都是具体情况下的具体方案, 针对配网故障研判的技术原则和流程策略缺乏总结和梳理, 难以有效指导配网抢修指挥业务技术支持系统的建设和推广应用。本文首先确定了配网故障研判的技术原则, 分析构建了实现配网故障研判策略的技术支持系统架构, 并在此基础上综合客户失电、低压线路失电、配变失电、分支线失电、主干线失电 5 个层次的故障研判逻辑, 提出一种基于分层拓扑模型的配电网故障研判流程。实际案例的分析结果证明了所提策略流程的有效性。

1 故障研判原则

配网故障研判是指依据系统采集的配网故障、95598 报修、计划停电、公专变及低压设备召唤量测等信息, 利用网络拓扑关系和营配调贯通结果, 通过综合分析, 判断故障位置、故障类型及停电范围。实现配网故障研判策略的基本原则主要包括信息来源准确性校验、信息来源自动过滤、信息交互技术要求、信息交互一致性原则等四个方面。

1.1 信息来源准确性校验

该原则应利用实时召测和“户-变-线-站”电源追溯, 逐级校验客户侧表计故障、配变故障、分支线故障和主干线故障等信息的准确性。

(1) 主干线开关跳闸信息应结合该线路下的分支线开关失电信息和多个配变停电告警信息, 校验主干线开关跳闸信息的准确性。

(2) 分支线开关跳闸信息应结合该分支线路下的多个配变停电告警信息, 校验分支线开关跳闸信息的准确性。

(3) 配变停电告警信息应通过实时召测配变终端及该配变下随机多个低压计量装置的电压、电流、负荷值来校验配变停电信息的准确性。

(4) 客户失电告警信息应通过实时召测客户侧低压计量装置的电压、电流、负荷值来校验客户失电告警信息的准确性。

1.2 信息来源自动过滤

各类告警信息推送到系统前, 应在已发布的停电信息范围内进行过滤判断。

1.3 信息交互技术要求

(1) 信息交互基于消息传输机制, 应实现实时信息、准实时信息和非实时信息的交换, 支持多系统间的业务流转和功能集成, 完成系统与其他相关应用系统之间的信息共享。

(2) 信息交互应满足国家发展和改革委员会第

14 号令, 采取安全隔离措施, 确保系统信息安全性。

(3) 信息交互宜采用面向服务架构(SOA), 在实现各应用系统之间信息交换的基础上, 对跨系统业务流程的综合应用提供服务和支撑。

1.4 信息交互一致性原则

(1) 信息交互时, 应采用统一交互原则, 确保各应用系统对同一对象描述的一致性。

(2) 与各系统交互时, 应对数据来源系统进行独立处理, 数据接口宜采用 Webservice 技术实现。

2 系统架构分析

配网抢修指挥研判实现的基础是涵盖“站-线-变-箱-户”多层次的实时监控、历史运行、设备台账等多维数据信息, 应在 1.4 节要求的基础上实现配网故障研判技术支持系统与配电自动化系统、调度自动化系统、生产管理系统、95598 营销业务系统等多个系统的数据交互, 如图 1 所示。

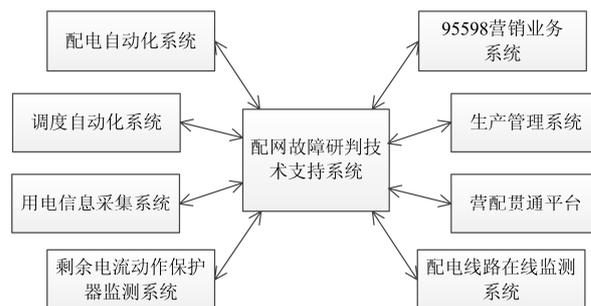


图 1 配网故障研判技术支持系统的数据来源

Fig. 1 Data sources of distribution network fault analysis technical support system

对应各系统主要提供的数据信息如表 1 所示。

表 1 各系统提供的数据信息

Table 1 Data information provided by each system

系统名称	提供的数据信息
配电自动化系统	开关变位及故障跳闸信息
调度自动化系统	开关事故分闸告警信息及保护动作信息
用电信息采集系统	配变、用户计量装置运行信息
剩余电流动作保护器监测系统	总闭锁告警等信息
95598 营销业务系统	用户报修信息涉及结构化地址、用户户号等信息
生产管理系统	中低压配电网相关的设备信息和网络拓扑关系
营配贯通平台	配变对应的用户结构化地址信息
配电线路在线监测系统	故障指示器短路、接地等告警信息

配网故障研判技术支持系统的整体架构如图 2 所示, 同时应满足标准性、安全性、可用性、可靠

性、扩展性、先进性要求。

(1) 系统应满足标准性要求，能在 UNIX、LINUX、WINDOWS 等主流操作系统中实现。系统图形、模型及对外接口规范等遵循 IEC 61968 和 IEC 61970、GB/T 30149、DL/T 1230 等标准相关规定。

(2) 系统应满足安全性要求，系统应满足国家发展和改革委员会第 14 号令和国能安全[2015] 36 号附件 6 的文件要求，安全防范应遵循 Q/GDW 377、ISO/IEC 24762 标准的相关规定。

(3) 系统应满足可用性要求，系统中的硬件、软件和数据信息应便于维护，有完整的检测、维护工具和诊断软件。

(4) 系统应满足可靠性要求，选用的软硬件产品应经过行业认证机构检测，具有可靠的质量保证。

(5) 系统应满足扩展性要求，系统容量、节点、功能均可扩充。

(6) 系统应满足先进性要求，系统硬件、软件、系统架构和设计思路应符合行业应用方向，满足配电网发展需求。

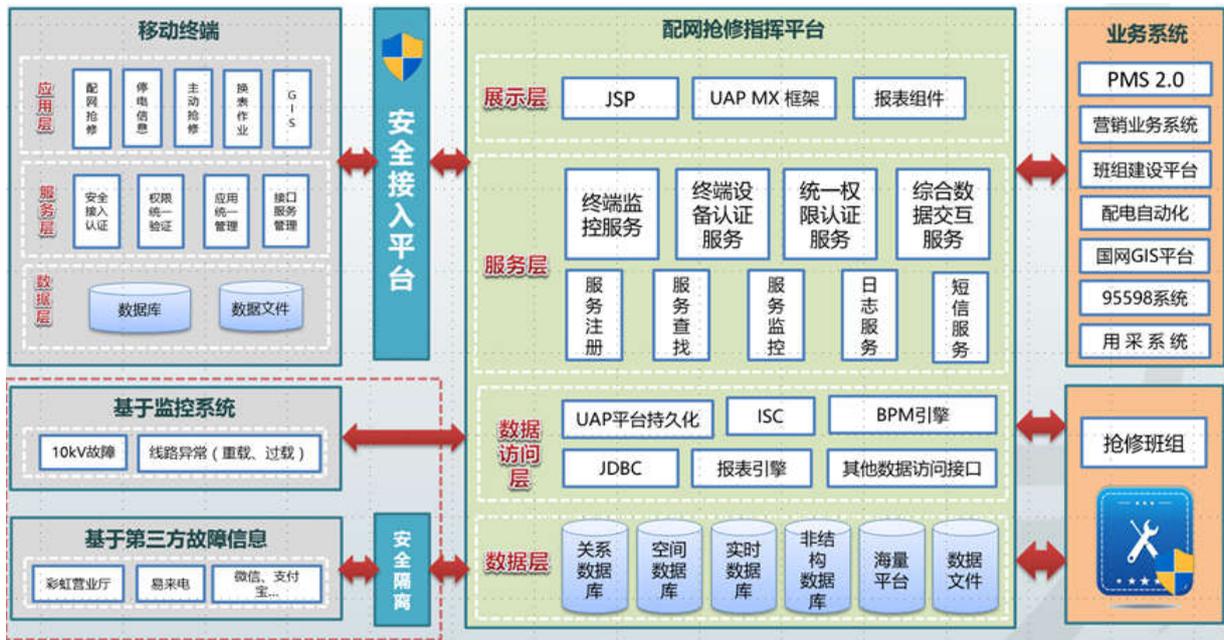


图 2 配网故障研判技术支持系统的整体架构

Fig. 2 Architecture of distribution network fault analysis technical support system

3 故障研判逻辑策略

在配网抢修指挥故障研判体系中，将配电网故障分为客户失电、低压线路失电、配变失电、分支线失电、主干线失电 5 个层次。为了准确实现配网故障的分级、分层研判，建立配电网分层拓扑模型^[19]；利用基于 CIM 的动态拓扑分析^[20]实现故障后网络拓扑关系及运行信息的更新；借鉴文献[9]中开关量信息故障研判原理，并将其扩展应用于用采系统实时召测的配变、用户计量装置运行信息，建立配网故障研判逻辑流程。

3.1 分层星型拓扑模型

分层星型结构网络分为多个层次，第一层为中心节点，以下每层是以上一层节点为父节点辐射出的节点。对于辐射状配电网，可通过分层星型拓扑建立结构模型，研究故障研判策略。建立配电网分

层星型拓扑结构如图 3 所示。

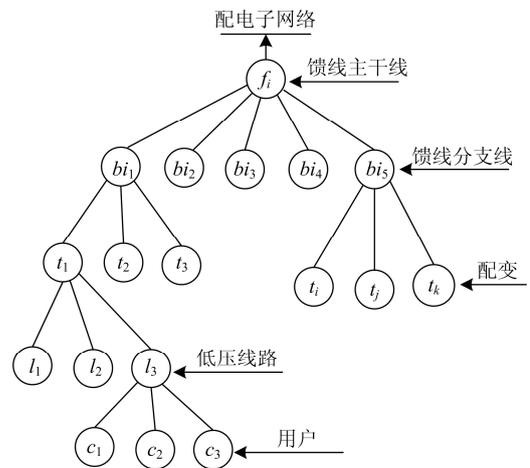


图 3 配电网分层拓扑模型

Fig. 3 Layering topology model of distribution network

图3中, 中心节点表示馈线主干线, 主干线以集合 $F=(f_1, f_2, \dots, f_n)$ 表示。分支线作为主干线的一部分, 为相应主干线的二级节点, 其中元素为该主干线对应的分支线, 以集合 $B=(b_1, b_2, \dots, b_n)$ 表示。以下三层分别为与上级配电设备对应的配变、低压线路及低压客户, 分别以集合 $T=(t_1, t_2, \dots, t_n)$ 、 $L=(l_1, l_2, \dots, l_n)$ 、 $C=(c_1, c_2, \dots, c_n)$ 表示。每一个父节点对应下一层一个子节点的集合; 每一组子节点集合对应上一层的一个父节点。

结合每层节点的数据结构, 定义运行(故障)信息向量 $P=(p_1, p_2, \dots, p_n)^T$, 若召测对应第 i 个节点的设备运行信息为失电, 则 $p_i=0$; 反之, 则 $p_i=1$ 。通过上下层节点连接关系, 可对节点的故障信息进行验证, 记父节点 g_k 的故障信息为 p_{gk} , 其对应所有子节点集合为 $G'_k=(g'_{k1}, g'_{k2}, \dots, g'_{kn})$, G'_k 的运行信息向量 $P'_k=(p'_{k1}, p'_{k2}, \dots, p'_{kn})^T$, 可以根据式(1)判别或验证 p_{gk} 。

$$p_{gk} = \begin{cases} 1 & G'_k P'_k \neq 0 \\ 0 & G'_k P'_k = 0 \end{cases} \quad (1)$$

3.2 配网抢修指挥分层故障研判策略

不同的故障告警信息触发不同层次的研判流程。若同一时段接收到多个告警信息, 根据图3所示的配电网分层拓扑模型, 从中心节点开始, 按照主干线失电、分支线失电、配变失电、低压线路失电、客户单户失电的顺序进行研判分析。

(1) 客户、低压线路、配变失电研判

接收到客户、低压线路、配变层节点失电告警信息或触发相应失电判断条件后, 首先由上至下根据下层子节点运行信息验证该节点失电信息的准确性, 然后由下至上进行电源点追溯至其上层父节点, 根据其父节点故障信息判断故障的上层边界。

例如对于低压线路失电, 首先依据图3所示网络拓扑模型由上至下获取该低压线路 l_j 节点对应的客户层子节点 C_j 。通过用电信息采集系统召测子节点的运行信息向量 P_{Cj} , 根据 P_{Cj} 校验低压线路失电告警信息的准确性。即

$$p_{l_j} = \begin{cases} 1 & C_j P_{Cj} \neq 0 \\ 0 & C_j P_{Cj} = 0 \end{cases} \quad (2)$$

若 $p_{l_j} \neq 0$, 则校验低压线路未失电; 若 $p_{l_j} = 0$, 即校验低压线路失电信息准确后, 应由下至上追溯至其配变层所属父节点 t_k 。根据式(1)求取 t_k 对应的故障信息 p_{tk} , 若 $p_{tk} = 0$, 则研判为配变故障; 若 $p_{tk} \neq 0$, 则研判为节点 l_j 对应的低压线路故障。

配变失电的故障研判流程与低压线路故障研判流程类似。对于客户失电, 由于客户层为最底层,

接到客户报修信息或触发低压计量装置失电判断条件后, 仅需通过式(1)校验失电客户节点 c_i 对应的配变层父节点 t_k 故障信息 p_{tk} , 实现故障范围的判断。

(2) 分支线、主干线失电研判

由表1可知, 配变、用户运行信息可通过用电信息采集系统提供, 而主干线、分支线的运行(故障)信息需通过调度自动化系统、配电自动化系统中开关变位信息, 结合配电线路网络拓扑关系获取。

配电系统中开关由出线开关[CB]、分段开关[SS]、联络开关[SL]组成, 以“1”表示开关闭合, “0”表示开关断开, 正常供电状态下各类开关状态为 $[CB_i] \equiv 1$; $[SS_m] \equiv 1$; $[SL_n] \equiv 0$, 此时, 图3所示配电网分层拓扑模型中“配电子网—主干线—分支线”三层拓扑可以以开关状态表示为基本拓扑如式(3)所示。

$$TP_0 = [CB; SS; SL] = TP_0 [1, 1, \dots, 1; 1, 1, \dots, 1; 0, 0, \dots, 0] \quad (3)$$

分段开关[SS]、联络开关[SL]功率有两种流向, 利用 $S_{i1}=[b_x, b_y]$ 表示基本拓扑中功率由分支线 b_x 流向 b_y , $S_{i2}=[b_y, b_x]$ 表示相反方向。

接到分支线开关告警或触发分支线失电判断条件后, 可根据以下步骤更新网络拓扑关系, 获取分支线层节点的运行(故障)信息。

1) 读取开关[CB]、[SS]、[SL]状态信息; $TP=[x_1, x_2, x_3, \dots]$; x_i 根据开关状态为“1”或“0”。

2) 遍历所有出线开关[CB]的运行状态, 若第 i 个主干线层节点 f_i 对应主干线出线开关 $[CB_i]=1$; 则其对应分支线层首个子节点运行信息 $p_{bi,1}=1$ 。该分支线层第 $j+1$ 个子节点运行信息可由式(4)求得。

$$\begin{cases} p_{bi,j+1} = [SS_m]; & (p_{bi,j} = 1, SS_{m,1} = [b_{i,j}, b_{i,j+1}]) \\ p_{bi,j+1} = 0; & (p_{bi,j} = 0, SS_{m,1} = [b_{i,j}, b_{i,j+1}]) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $SS_{m1}=[b_{ij}, b_{i,j+1}]$ 表示开关 $[SS_m]$ 所属连接点为 b_{ij} 和 $b_{i,j+1}$ 。

3) 遍历所有联络开关[SL]的运行状态, 若 $[SL_k]=1$, 并且 $[SL_k]$ 连接的两条分支线 b_{mX} 、 b_{nY} 中任一 $p_{bmX}=1$, 则 $p_{bnY}=1$, 然后以联络开关 $[SL_k]$ 为电源点, 按照式(4)方式对分支线 b_{nY} 所属主干线中所有运行状态为0的分支线更新其运行状态, 更新时, 相应分段开关[SS]首末节点位置互换。

接到主干线开关失电告警信息或触发主干线开关失电判断条件后, 根据其出线开关运行状态 $[CB_j]$ 及该主干线 f_j 节点对应的分支线和配变层子节点 B_j 、 T_j 故障信息向量 P_{Bj} 和 P_{Tj} , 利用式(1)校验失电告警信息的准确性。若 $p_{fj} = 0$ 且 $[CB_j] = 0$, 则研判为主干线故障。

综合上述主干线失电、分支线失电、配变失电、低压线路失电、客户单户失电故障研判流程, 可得到基于分层拓扑模型的配网故障研判策略流程, 如图 4 所示。

在图 4 中, g 、 g' 、 g'' 分别代表本次故障信息校验研判循环中故障信息设备对应节点、其对应的下层子节点及上层分界点; p 、 p' 、 p'' 则分别表示 g 、 g' 、 g'' 的故障信息值。根据故障告警信息所属设备类型, 首先根据其下层子节点故障信息验证告警信息的正确性, 然后根据其父节点故障信息研判其故障边界, 若研判结果为父节点对应故障信息为 0, 则继续进行上层节点的故障信息研判。

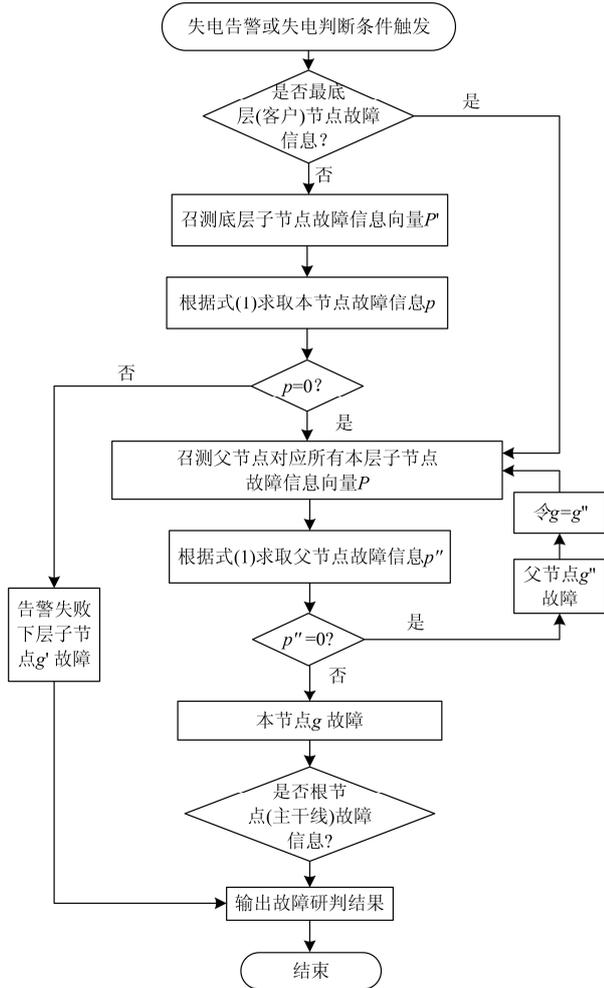


图 4 基于分层拓扑模型的配电网故障研判流程

Fig. 4 Fault identification strategy for distribution network based on layering topology model

4 实际算例分析

以济南地区实际配网故障研判过程为例, 对本文所述方法的准确性及可靠性进行分析。首先基于 95598 营销业务系统接收到白马山居委会某用户失

电报修信息, 但该台区低压线路未安装采集装置, 根据报修用户结构化地址、用户户号等信息, 确定该用户所属线路为 10 kV 王官 I 线, 对应的主干线结构如图 5 所示。调用调度自动化系统发现 10 kV 王官 I 线变电站内开关未跳闸, 线路分支线开关配电自动化终端通信功能异常, 无法监测图 5 中分支线开关运行状态。

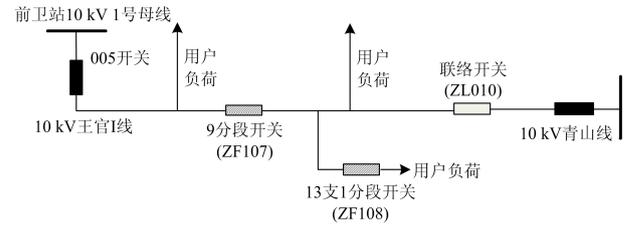


图 5 10 kV 王官 I 线单线图

Fig. 5 Diagram of 10 kV Wangguan I line

基于图 4 所示研判流程和已有的客户层失电信息, 依照图 3 所示网络拓扑模型由下至上追溯至其所属配变为白马山居委会配变。记该配变节点为 t_1 , 通过用电采集系统实时召测该配变所属 10 个用户层子节点运行信息如表 2 所示。根据表 2 可得该配变台区 t_1 对应的 10 维客户层子节点 C_1 的故障信息向量 $p_{C1} = \{0, 0, \dots, 0\}^T$, 利用式(2)计算白马山配变运行信息 $p_{t_0} = 0$, 可知节点 t_1 白马山居委会配变失电。

表 2 白马山居委会低压用户召测信息汇总

Table 2 Information of low-voltage users located in Baimashan committee

序号	用户户号	用电地址	电压值/V	电流值/A
用户 1	027****264	XX 小区 15-6-501	0	0
用户 2	027****893	XX 小区 3-4-201	0	0
用户 3	027****604	XX 小区 4-1-102	0	0
用户 4	027****175	XX 小区 12-3-401	0	0
用户 5	027****188	XX 小区 10-3-502	0	0
用户 6	027****763	XX 小区 15-3-101	0	0
用户 7	027****337	XX 小区 8-1-101	0	0
用户 8	027****587	XX 小区 3-4-502	0	0
用户 9	027****858	XX 小区 16-1-302	0	0
用户 10	027****750	XX 小区 15-2-602	0	0

确认白马山居委会配变 t_1 失电信息后, 继续向上验证其上层节点(分支线)运行信息。根据图 1 中王官 I 线线路结构可知, 其对应下层分支线子节点共有 3 个, 分别为 9 杆前段、9 杆后段(不包括 13 支 1 杆后段)、13 支 1 杆后段, 对应由节点 b_1 、 b_2 、 b_3 表示。白马山居委会配变对应分支线为 13 支 1 杆后段后段 b_3 , 其结构如图 6 所示。

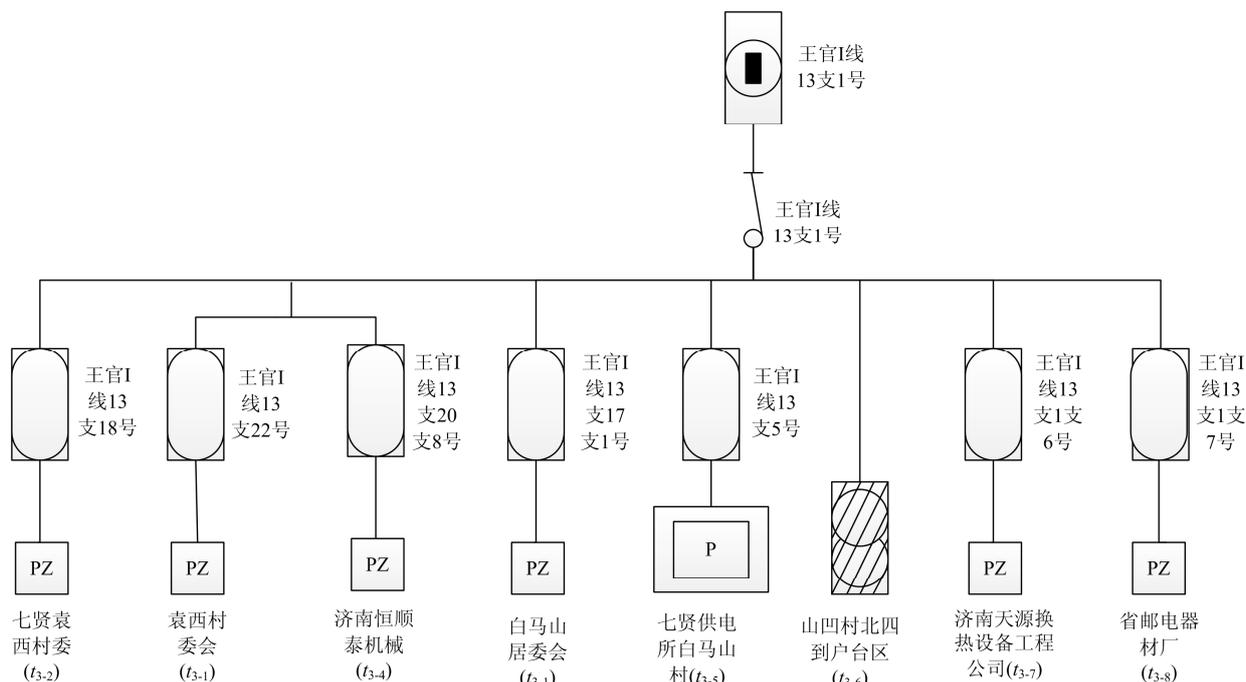


图 6 王官 I 线 13 支 1 杆后段分支线及配变结构

Fig. 6 Construction of the branch behind pole 13-1 of Wanguan I line and its distribution transformers

由图 6 可知, 该分支线下层共 8 个配变层子节点。针对每个配变层子节点, 根据其客户层子节点运行情况召测信息可以得到王官 I 线 13 支 1 杆后段 8 个配变节点运行(故障)信息如表 3 所示。

表 3 王官 I 线 13 支 1 杆后段配变节点运行信息

Table 3 Operating information of the distribution transformer behind pole 13-1 of Wanguan I line

配变(t)	t_{3-1}	t_{3-2}	t_{3-3}	t_{3-4}	t_{3-5}	t_{3-6}	t_{3-7}	t_{3-8}
故障信息(p)	0	0	0	0	0	0	0	0

由表 3 可知, 该分支线 b_3 对应的 8 维配变层子

节点 T_3 的故障信息向量 $p_{T_3} = \{0, 0, \dots, 0\}^T$, 利用式 (3) 计算王官 I 线 13 支 1 杆后段分支线运行信息 $p_{b_3} = 0$ 。可知节点 b_3 王官 I 线 13 支 1 杆后段分支线失电。

确认王官 I 线 13 支 1 杆后段分支线 t_1 失电信息后, 继续向上验证其上层节点(分支线)运行信息。由于图 5 中分支线开关运行状态无法监测, 无法直接通过支线开关状态获取分支线运行(故障)信息, 因此, 通过分支线下层配变节点运行(故障)信息校验各分支线运行信息。王官 I 线相关分支线 b_1 、 b_2 及其所属配变结构如图 7 所示, 各配变节点运行信息如表 4 所示。

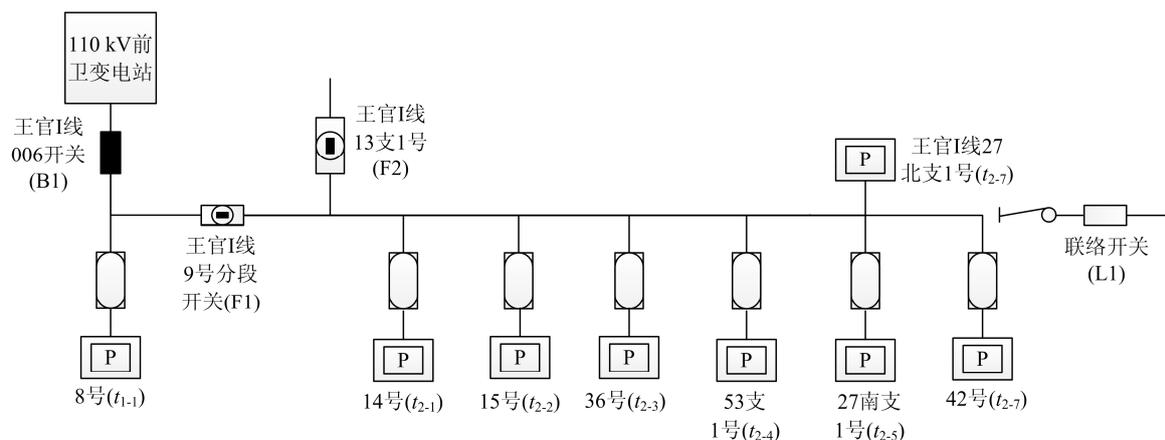


图 7 王官 I 线 13 支 1 杆前段分支线及配变结构

Fig. 7 Construction of the branch in front of pole 13-1 of Wanguan I line and its distribution transformers

表 4 王官 I 线 13 支 1 杆前段配变节点运行信息

Table 4 Operating information of the distribution transformer in front of pole 13-1 of Wangguan I line

配变(<i>t</i>)	<i>t</i> ₁₋₁	<i>t</i> ₂₋₁	<i>t</i> ₂₋₂	<i>t</i> ₂₋₃	<i>t</i> ₂₋₄	<i>t</i> ₂₋₅	<i>t</i> ₂₋₆	<i>t</i> ₂₋₇
运行信息(<i>p</i>)	1	1	1	1	1	1	1	1

由图 7 及表 4 可知,分支线 b_1 仅对应 1 个配变层子节点, $p_{r1}=1$, 因此 $p_{b1}=1$; 分支线 b_2 对应的 7 维配变层子节点 T_2 的故障信息向量 $p_{T2}=\{1, 1, \dots, 1\}^T$, 因此 $p_{b2}=1$; 根据式(4)计算主干线故障信息 $P_F=1$, 由此验证主干线未失电, 与王官 I 线变电站内开关运行状态相符。最终的故障研判结果为王官 I 线 13 支 1 杆分段开关后段分支线故障失电。

配网抢修指挥人员根据研判结果通知现场抢修人员对王官 I 线 13 支 1 杆分段开关进行现场检查, 确认开关跳闸, 并巡视王官 I 线其他区段线路及配变运行良好, 由此证明故障研判结果正确。

该故障研判过程中, 以客户失电报修信息为起点, 结合实时召测的相关用户和配变运行信息, 基于本文提出的故障研判策略能快速准确地确定故障区域和失电范围, 较传统的故障巡视时间大大减少, 有效提升了配网故障处理效率。

5 结论

本文梳理了配网故障研判的四项技术原则: 信息来源准确性校验、信息来源自动过滤、信息交互技术要求、信息交互一致性原则; 通过与配电自动化系统、调度自动化系统、生产管理系统、95598 营销业务系统等多个系统的数据交互, 构建了实现配网故障研判策略的技术支持系统架构; 在此基础上提出一种基于分层拓扑模型的配电网故障研判流程, 该流程综合涵盖客户失电、低压线路失电、配变失电、分支线失电、主干线失电 5 个层次的故障研判逻辑。实际案例的分析结果证明了所提策略流程的有效性, 切实提升了配网抢修指挥技术支持系统建设的规范性。

本文梳理的配网故障研判技术原则和流程策略, 对标准化配网抢修指挥技术支持系统的建设有较强指导意义。在配电网规模较大情况下, 本文提出的基于分层拓扑模型的配电网故障研判流程, 数据处理及运算量大, 在计算速度上仍有提升空间。未来可结合智能算法、DS 证据理论等开展故障研判流程的优化研究, 以提高运算效率, 提升应用系统运行的流畅性。

参考文献

[1] 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.

[2] HUANG Junhui, GE Shaoyun, HAN Jun, et al. A diagnostic method for distribution networks based on power supply safety standards[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 63-70. DOI: 10.1186/s41601-016-0020-2.

[3] 马士聪, 高厚磊, 徐丙垠, 等. 配电网故障定位技术综述[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(11): 119-124. MA Shicong, GAO Houlei, XU Bingyin, et al. A survey of fault location methods in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(11): 119-124.

[4] 刘健, 张志华, 张小庆. 配电自动化主站的容错故障定位方法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(20): 6-11. LIU Jian, ZHANG Zhihua, ZHANG Xiaoqing. Fault location with robustness for distribution automation systems[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(20): 6-11.

[5] 张伟. 一种智能分布式馈线自动化故障判定方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(5): 108-113. ZHANG Wei. An intelligent distributed feeder automation fault judgment[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(5): 108-113.

[6] 刘鹏程, 李新利. 基于多种群遗传算法的含分布式电源的配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 36-41. LIU Pengcheng, LI Xinli. Fault-section location of distribution network containing distributed generation based on the multiple-population genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(2): 36-41.

[7] 马腾飞, 高亮. 含多微网的主动配电网故障区段定位算法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 64-68. MA Tengfei, GAO Liang. Fault location algorithm for active distribution network with multi micro-girds[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 64-68.

[8] 周静, 张兴, 贾晨. 基于多源故障信息的故障定位方法在配网抢修中的应用[J]. 华北电力技术, 2015(4): 25-29. ZHOU Jing, ZHANG Xing, JIA Chen. Application of fault location method based on multi-source fault information in repair of distribution network[J]. North

- China Electric Power, 2015(4): 25-29.
- [9] 姚琰, 郝晓光, 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-EPSC, 2017, 29(2): 50-55.
- [10] 林霞, 李瑶, 李强, 等. 基于多 Agent 的分层扩展电网故障信息融合处理系统[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 129-137.
LIN Xia, LI Yao, LI Qiang, et al. Information integration processing system of layered-expanding grid fault based on multiple Agent[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 129-137.
- [11] 宋杰, 谢海宁, 杨增辉, 等. 基于多源异构数据挖掘的配电网故障信息统计分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 141-147.
SONG Jie, XIE Haining, YANG Zenghui, et al. Statistical analysis of the distribution fault based on multiple source and isomerism data mining technology[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 141-147.
- [12] 杨成月, 林扬宇. 基于 GIS 的配网生产抢修指挥平台关键功能研究与应用[J]. 电力信息化, 2012, 10(10): 92-95.
YANG Chengyue, LIN Yangyu. Research on GIS-based distribution network production repairing command platform and its applications[J]. Electric Power IT, 2012, 10(10): 92-95.
- [13] 熊军, 苏雪源, 詹建荣, 等. 基于生产管理系统的配网生产抢修指挥平台研究[J]. 供用电, 2013, 30(4): 31-35.
XIONG Jun, SU Xueyuan, ZHAN Jianrong, et al. Study and implementation of distribution network production repairing command platform based on GPMS[J]. Distribution & Utilization, 2013, 30(4): 31-35.
- [14] 杨剑梅, 苟霖, 马青, 等. 配电网故障研判搜索定位系统研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(8): 59-63.
YANG Jianmei, GOU Lin, MA Qing, et al. Research on distribution network fault analysis and search orientation system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(8): 59-63.
- [15] 吴琳, 周养浩, 吴雪琼. 天津城市配电网智能互动抢修服务系统设计与开发[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(18): 79-85.
WU Lin, ZHOU Yanghao, WU Xueqiong. Design and development of intelligent interactive repair service system in Tianjin urban distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(18): 79-85.
- [16] 房牧, 许明, 王兴念, 等. 配网生产抢修指挥支撑技术研究与应用[J]. 供用电, 2013, 30(3): 11-16.
FANG Mu, XU Ming, WANG Xingnian, et al. Research and application of the support technology for conducting urgent repairs to distribution network[J]. Distribution & Utilization, 2013, 30(3): 11-16.
- [17] 周伟锋, 庄晓丹. 基于营配贯通的配网生产抢修指挥平台[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(4): 79-83.
ZHOU Weifeng, ZHUANG Xiaodan. The distribution network production repairing command platform based on CIS and PMS[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(4): 79-83.
- [18] 帅志飞, 王沁, 阎文浩, 等. 一体化智能抢修指挥系统在电网调度中的应用[J]. 电力与能源, 2013, 34(6): 608-612.
SHUAI Zhifei, WANG Qin, LÜ Wenhao, et al. Application of integrated intelligent emergency command system in the grid dispatching[J]. Power & Energy, 2013, 34(6): 608-612.
- [19] 林景栋, 曹长修, 张帮礼. 基于分层拓扑模型的配网故障定位优化算法[J]. 继电器, 2002, 30(8): 6-9.
LIN Jingdong, CAO Changxiu, ZHANG Bangli. Optimized algorithm of fault section diagnosis for distribution networks based on hierarchical model[J]. Relay, 2002, 30(8): 6-9.
- [20] 楼宗明, 章坚民, 庄晓丹, 等. 基于在线开关状态和 DG 角色的动态配电网拓扑分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 64-69.
LOU Zongming, ZHANG Jianmin, ZHUANG Xiaodan, et al. Dynamic topologic analysis of distribution network based on on-line switch and DG states[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 64-69.

收稿日期: 2017-06-09; 修回日期: 2018-01-25

作者简介:

游大宁(1977—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行与控制;

瞿寒冰(1985—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统调度运行与控制。E-mail: winter_008@126.com

(编辑 张爱琴)