

基于多维信息融合的配电网故障研判系统研发与应用

丁俊¹, 毛志宇², 刘文许¹, 李培强²

(1. 国网湖南省电力有限公司长沙供电分公司, 湖南长沙 410035; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南长沙 410082)

摘要: 针对某城市配电网故障定位自动化程度低、各系统数据利用不足等情况, 从数据融合的角度出发, 通过内部专网将配电网调度管理系统、SCADA 系统、融合终端及用采系统等系统数据进行融合, 开发基于多维信息融合的配电网故障研判系统。该系统可分为前台操作界面和后台服务器两部分, 前台操作界面基于 Visual C++6.0 开发环境, 将各功能部分模块化; 后台服务器由基于 Java Web 技术进行开发的数据库系统实现。该系统操作方便、运行可靠、适用性强且扩展性好, 能实现配电网故障定位、隔离和配电网网络重构, 方便在全省范围内推广, 对配电网自动化的发展具有实际工程意义。目前已在某地区试运行, 效果良好。

关键词: 多维信息融合; 配电网故障定位; 故障隔离; 配电网网络重构

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2023.03.028 中图分类号: TM863 文章编号: 1673-9140(2023)03-0252-09

Development and application of distribution network fault diagnosis system based on multi-dimensional information fusion

DING Jun¹, MAO Zhiyu², LIU Wenxu¹, LI Peiqiang²

(1. Changsha Power Supply Branch, State Grid Hunan Electric Power Co., Ltd., Changsha 410035, China;

2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: Based on the perspective of data fusion, in response to the low level of automation in fault localization in a certain city's power distribution network and underutilization of data from various systems, a multidimensional information fusion-based power distribution network fault diagnosis system is developed. It is achieved by integrating system data from the distribution network dispatch management system, SCADA system, fusion terminals, and data acquisition systems via an internal private network. The system can be divided into two parts: the front-end user interface and the back-end server. The front-end user interface is developed using the Visual C++6.0 development environment and modularizes different functional components. The back-end server is implemented using a database system developed based on Java Web technology. The system is user-friendly, reliable in operation, highly adaptable, and exhibits good scalability. It enables fault localization, isolation, and reconstruction in power distribution networks. It is convenient for province-wide promotion and holds practical engineering significance for the development of power distribution automation. The system has been undergoing trial operation in a specific region, and the results have been positive.

Key words: multidimensional information fusion; distribution network fault localization; fault isolation; distribution network reconstruction

收稿日期: 2021-06-11; 修回日期: 2021-07-26

基金项目: 国网湖南省电力有限公司科技项目(5216A120008D)

通信作者: 李培强(1975—), 男, 博士, 教授, 主要从事电力系统运行优化与控制等研究; E-mail: 596905210@qq.com

随着城市的快速发展和人们生活水平的提高,电力需求也迅速增加,对供电可靠性要求也越来越高。而配电网是电力系统的末端环节,承担着为用户供电的重要任务,其运行稳定性和供电可靠性将直接影响用户的用电满意度^[1-2]。

配电网故障定位是实现故障隔离与供电恢复的前提,对提升配电网供电可靠性和电能质量具有重要意义^[3-4]。随着智能化水平的提升,馈线终端单元(feeder terminal unit, FTU)、数据采集与监视控制系统(supervisory control and data acquisition, SCADA)等配电自动化设备投入运行^[5-7]。目前,国内大多数供电企业通过部署配变设备监控系统、配电线路监控系统、台区监控管理系统、配电网调度管理系统以及配电自动化调试系统等来实现对配电网馈线的自动化管理和维护^[8],但各系统的操作是独立的,对于不同的操作指令,运维人员需要在多个系统间频繁切换,其效率低下、数据共享能力不高^[9]。

配电网主动故障研判系统通过企业内部专网,

将配电网调度管理系统、SCADA 系统及融合终端等数据源进行融合与交互,能够实现故障的定位、隔离及配电网重构,并将处理结果展示到监控中心的大屏幕上^[10-12]。运维人员通过监控中心内部配置的大屏幕控制终端主机,对馈线自动化的业务信息进行综合查看,从而对配电网馈线自动化管理业务中的实时状态、业务数据和管理情况进行全面了解和把握。此外,系统还具备功能完善、设计新颖、操作简单以及扩展性好等优势。

1 系统结构和功能

配电网主动故障研判系统有数据层、数据访问层、服务层和业务层 4 个层次,其结构如图 1 所示。系统基于配电网拓扑图和监测设备的实时信息可完成故障的实时定位、隔离和配电网重构。此外,还支持自动处理、人机交互处理 2 种模式,具备在线、离线和仿真 3 种运行状态。

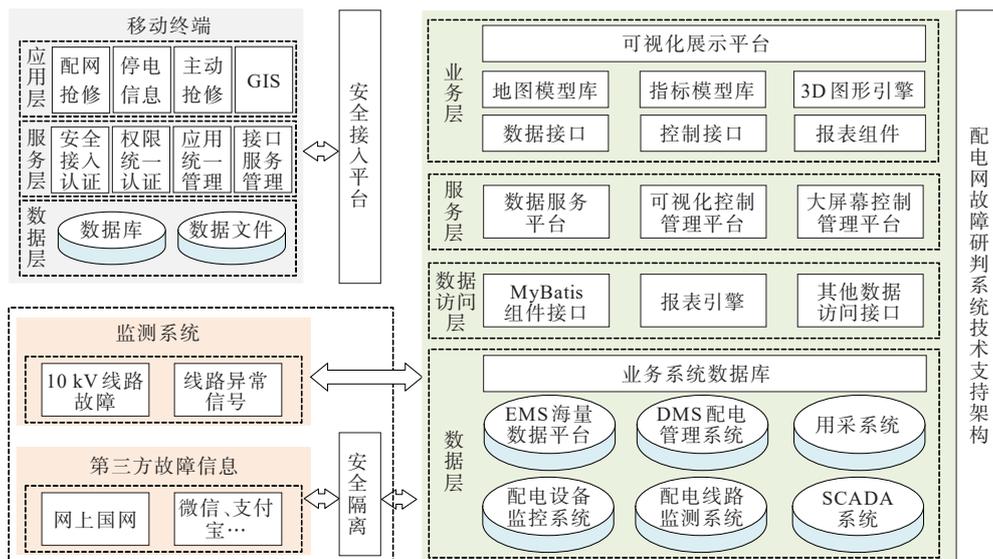


图 1 配电网故障研判系统技术构架

Figure 1 Technical framework of distribution network fault diagnosis system

根据配电网支路监测设备的运行状态可分为在线和离线 2 种状态,在线状态是指系统实时监测支路的运行状态,当检测有异常信号时,能自动分析该异常信号并根据后台算法进行研判得出结果。离线状态记录监测设备发出的异常信号,不对其进行分析。仿真状态主要是对投入在线运行前线路的故障处理功能进行检验。

在处理形式上有人机交互、自动处理 2 种形式。人机交互处理通过系统的可视化界面实现,能着色故障区域并给出故障研判依据、隔离和恢复方案,此外,系统还支持操作预演,运维人员可提前分析该方案的可行性。自动处理是系统针对监测设备给出的异常信号,基于后台算法自动定位故障区域,并对其进行隔离和网络重构。

2 系统的构建思路及原则

2.1 系统的构建思路

该系统基于 windows 操作系统采用面向对象的编程技术开发完成,分为后台数据库和前台运行界面两部分,分别由 Visual C++6.0、Java Web 技术实现。数据交互是在公司内部专网环境下,利用 Oracle 数据库、SQL Server 数据库的内部机制来实现。此外系统还采用了多种接口技术,将数据库和功能模块有机地组合成整体。

从系统内部功能的角度出发,对软件的逻辑、组件和服务进行层次划分,建立高度清晰、高效运转的软件服务模型。采用4层软件架构的设计思路,将系统功能封装为业务层、服务层、数据访问层和数据层。数据层封装了业务、图形等数据;服务层封装了数据服务、可视化控制管理和大屏幕控制管理功能;业务层封装了监控中心内部的大屏幕展示服务、PC 终端及 PDA 设备的终端交互服务。

2.2 系统的设计原则

系统设计需满足如下基本要求:

标准性 能在 Windows、Linux 等系统中实现;系统数据接口遵循 IEC 61968 和 IEC 61970 规范^[13];

安全性 保证拓扑结构及运行方式的改变,不会对故障的分析和处理造成影响,对现有网络结构的合理性能作出校验,对错误数据能做出辨识;

可靠性 在运行过程中对可能的误操作菜单项通过“暗淡”显示来“闭锁”该项操作,已发生误操作需给出提示引导正确操作,不能终止运行^[14]。

可扩展性 各功能部分用独立模块完成,当平台需要增加新的功能时,只需在系统中加入相应的功能模块,并加到界面上的菜单项中即可;

设计人性化 采用基于双屏推图的人机交互界面,操作员可根据图中信息提示操作控件来完成各项功能。

3 基于多维信息融合的配电网故障定位核心算法

随着馈线断路器、监测终端(FTU)和故障指示

器(fault indicator, FI)等检测设备的增加,在故障情况下采集到大量信息,这为配电网故障定位打下了基础,系统采用改进矩阵算法作为故障定位的理论基础^[15]。

3.1 正常运行时配电网结构矩阵

由于系统只需要监测设备的状态信息,因此,将断路器监测终端、FTU 及故障指示器等监测设备均视为故障指示类设备。由于配电网的运行方式大多为单端供电,以放射型配电网为例,对改进矩阵算法的原理进行说明,如图 2 所示。

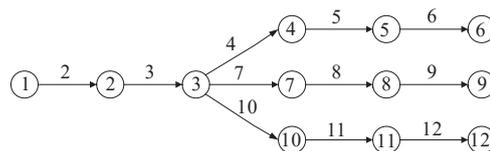


图 2 放射型配电网

Figure 2 Radiative distribution network

当考虑该分支线的故障定位时,先不考虑首、末端故障指示器,因此矩阵不对 1、6、9、12 检测设备编号。将故障指示设备看作节点,则矩阵阶数等于节点数,若节点 i 、 j 之间有一条支路,则令 D_{ij} 为 1,反之为 0。在形成 D 矩阵时,为了使节点数和支路数相对应,进行升序编号(图 2)。该网络结构矩阵为

$$D = \begin{matrix} & N(2) & N(3) & N(4) & N(5) & N(7) & N(8) & N(10) & N(11) \\ \begin{matrix} N(2) \\ N(3) \\ N(4) \\ N(5) \\ N(7) \\ N(8) \\ N(10) \\ N(11) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (1)$$

3.2 故障信息矩阵

故障信息矩阵 G 是根据故障指示设备的状态形成,与 D 矩阵同阶,当节点 i 发出故障信号,则令

$$\sum_{k=1}^N g_{ik} = 0, \sum_{k=1}^N g_{ki} = 0, \text{ 否则 } g_{ii} = 1, g_{ij} = 0, g_{ji} = 1 \text{ (其中 } i \neq j \text{)。假设在 5 处发生故障,则其故障矩阵为}$$

$$G = \begin{matrix} & N(2) & N(3) & N(4) & N(5) & N(7) & N(8) & N(10) & N(11) \\ \begin{matrix} N(2) \\ N(3) \\ N(4) \\ N(5) \\ N(7) \\ N(8) \\ N(10) \\ N(11) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (2)$$

当配电网在某一时刻只发生单一故障时,根据功率流向依次检测故障指示器的状态,由判断逻辑可知,第 1 个未检测至报警与一个发出报警的故障指示器间的区段就是故障区段。在进行故障分析时,可根据故障判断矩阵里的元素结合判断规则迅速得到故障区段。

3.3 故障判断矩阵

D 、 G 矩阵进行积运算可得到故障判断矩阵 Q , 结合案例的 D 、 G 矩阵, 可得 Q 矩阵为

$$Q = \begin{matrix} & N(2) & N(3) & N(4) & N(5) & N(7) & N(8) & N(10) & N(11) \\ \begin{matrix} N(2) \\ N(3) \\ N(4) \\ N(5) \\ N(7) \\ N(8) \\ N(10) \\ N(11) \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (3)$$

由 Q 矩阵可知, 只有同时满足 D 中的 $d_{ij} = 0$ 和 G 中的 $g_{ij} = 0$, 才有 Q 中的 $q_{ij} = 1$, 因此, $q_{ij} = 1$ 可表示 i 、 j 节点间存在一条支路, 且 j 节点对应的故障指示器未报警; 而 D 中的 $d_{ij} = 0$ 和 G 中 $g_{ij} = 0$ 都可使 Q 中的 $q_{ij} = 0$, 所以 $q_{ij} = 0$ 表示 i 、 j 节点间不存在支路或 j 节点对应的故障指示器报警。

故障区间的判定原则: 若区段两端的故障指示器都发出报警信号或者都未报警, 则该区段不是故障区段; 若该区段上游第 1 个故障指示器有报警信号, 下游第 1 个故障指示器没有报警, 则将该区段标记为疑似故障区段。用 Q 矩阵中元素表示: 若 $q_{ij} \oplus q_{ji} = 1 (\oplus$

为异或), 则节点和节点间的区段为故障区段。

3.4 线路分支点故障区段二次确认

当节点为 T 节点或多分支节点时, 需要对该节点的下一区段进行二次判定, 先将该分支节点对应的故障区段标为疑似故障区段, 如果该节点下游区域对应区段的第 1 个节点对应的故障指示器都报警, 则该区域为非故障区域, 否则为故障区段。最后, 还需对供电首、末端处 (节点 1、5、8、11 下游第 1 个) 的区段进行故障诊断。对于末端故障指示器只需检测到故障指示器报警, 则对应下游区段为故障区段, 反之, 为非故障区段。首端故障指示器与其下一故障指示器配合判断。

4 系统的关键技术和实现方法

系统采用面向对象的程序设计方法进行设计^[16-17], 以对象为核心。“对象”是指封装了数据及数据相关的操作, 是系统中的基本运行实体; “属性”是指对象的性质和状态特征; “方法”是指改变对象属性的操作; “事件”是指请求对象执行某一操作或回答某些信息的要求^[14]。菜单和控件是系统的基本对象, 所需功能是通过编写事件的驱动程序、设置属性和方法调用来实现。

4.1 数据服务功能实现

数据服务功能模块如图 3 所示, 基于 Java Web 技术开发, 同时为提高开发效率, 采用了 SSM 的第三方功能组件。根据 Java 平台技术规范, 开发中数据服务功能模块的 WebService Java 类结构分别设置为对应的数据对象类、Active 活动类及数据服务功能管理类。

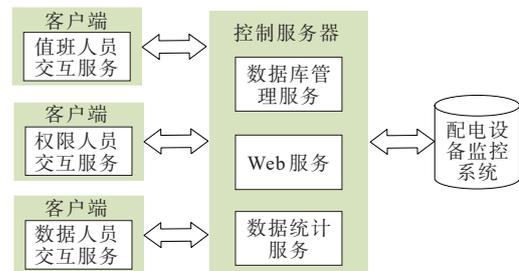


图 3 数据服务功能模块

Figure 3 Function model of data service module

1) 数据对象类。

首先用 MyBatis 组件接口对后台通用数据库进

行持久化操作,将数据对象类与后台数据库中的数据表结构进行对应;然后在接口中以 Get、Set 命令读取和写入数据属性,再在 MyBatis 组件的 XML 配置文件中关联上述数据对象类的定义和后台通用数据表的定义,便可实现对数据服务进行持久化管理。

2) Active 活动类。

Active 活动类一一对应于数据对象类,包含了拓扑数据管理活动类(GridNetTopActive)、管理人员数据管理活动类(ManagerActive),可根据数据对象类的内部属性设置对这些业务数据的增删改查,完成对 Active 活动类的内部接口设置。

3) Manage 管理类。

Manage 管理类用于调用 Active 活动类接口,按照监控中心发出的数据服务请求指令,将对应数据修改请求发送到对应的 Active 活动类中进行处理。首先通过 Manage 管理类进行管理,然后调用对应的 Active 活动类接口,最后通过数据对象类的 get 接口、set 接口对目标数据表结构持久化处理,实现具体的数据服务功能处理。

4) 数据交互。

数据交互功能实现流程如图 4 所示,采用 C++ 技术实现数据交互,并以 Windows 服务的形式封装该功能模块并运行于后台服务器。基于 TCP 通信协议,通过 TCP/IP Socket 套接字来接受和解析数据,并以字节和字符串形式进行数据转换,最终得出配电自动化管理数据结果。其他外部业务软件则利用软件供应商提供的驱动接口导入对应的 DLL 功能文件,然后,通过 ImportDll 技术读取服务接口得到其函数列表,再对对应函数进行调用。

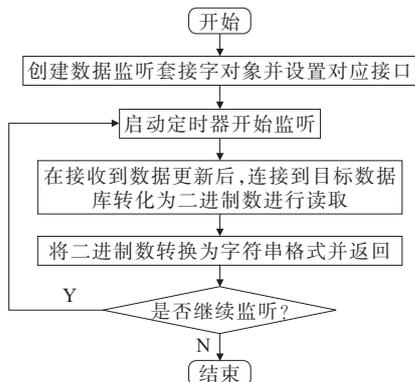


图 4 数据交互功能实现流程

Figure 4 Realization process of data interaction function

4.2 系统展示功能实现

大屏幕展示功能模块主要有数据压缩、RGB 信号接入、图像拼接、图像缩放以及 KVM 控制器等的交互处理。

1) 大屏幕数据处理。

系统基于 LZ-78 算法对非结构化文本信息进行压缩和处理。为替代非结构文本中的词语,将多叉树叶节点封装为长度为 1 B 的短整型,实现信号的压缩处理;然后对多叉树中的节点内容进行词语匹配,如果匹配成功,则将编号进行替换,否则将该词语文本内容进行替换。数据压缩功能实现流程如图 5 所示。

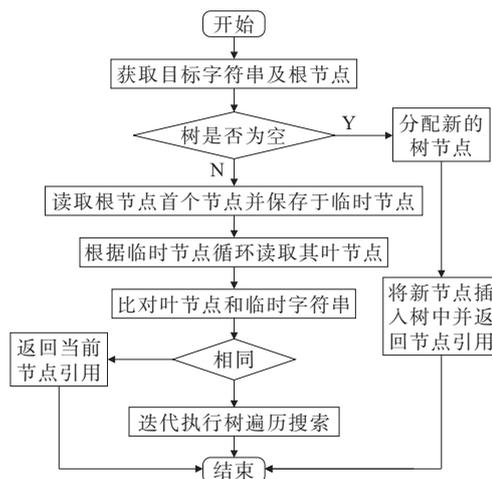


图 5 数据压缩功能实现流程

Figure 5 Implementation flow of data compression function

2) 大屏幕通信功能。

串口通信功能主要解决了大屏幕拼接处理器与大屏幕系统、图形工作站之间的数据通信服务,采用 RS232 总线通信接口,数据通信方式为串行通信。系统用 EIA 串行通信技术标准进行实现,用 Control Center 的配置器软件对串口通信的参数进行定义,然后通过 Apollo 控制器的功能接口来控制 and 拼接大屏幕系统,从而实现对大屏幕的可视化布局、展示内容等的动态更新。

4.3 系统控制功能实现

大屏幕控制功能模块功能实现的核心是基于 NAS 机制和控制服务器的数据交互、数据的图形化处理及处理结果的信号输出等。

1) 控制服务器的数据交互。

通过“service-load nas start”指令设置 NAS 服务

的自启动,再用NAS服务组件中的setfacl指令配置所需交互的数据参数,建立NAS数据交互服务的基础配置;然后,通过mount挂载指令对控制服务器中的数据上报加载处理,在后台数据库中设置本地数据库IP地址及数据视图。系统图形工作站则直接通过NAS服务插件接口,利用C++编程实现。

2) 数据可视化。

系统在开发中选择FineReport组件技术来实现数据可视化功能。利用Power Map套件对大屏幕中GIS的可视化展示进行处理,在图形工作站部署FineReport和PowerMap功能组件的配置文件和功能服务文件,再将路径添加到图形工作站系统配置路径便可进行数据可视化功能处理。将FineReport套件中的分辨率设置为大屏幕显示分辨率,然后对FineReport的模板路径进行配置,再将上述配置信息全部封装为LAY文件,并添加到图形工作站FineReport/layout目录下。随后,通过FineReport套件的API开发接口,用C++语言实现图形工作站布局调度以及更新处理对应的可视化内容数据。大屏幕数据交互功能实现流程如图6所示。

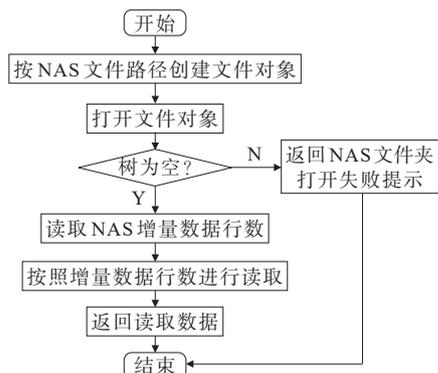


图6 大屏幕数据交互功能实现流程
Figure 6 Realization process of large screen data interaction function

系统中主要使用GIS进行页面展示,不涉及GIS图上操作功能,所以只需PowerMap组件提供图形数据,将GIS对象的数据源设置为图形工作站,基于NAS机制获取的业务数据,将其目标范围设置为“长沙市”即可得到本系统所用的GIS地理区域。考虑到电子地图的实际展示效果,设置Liral倾斜度参数中的X为-15、Y为0,可实现电子地图的倾斜展示效果,最后,更新PowerMap套件的引用服务,实现GIS对象的自动加载和可视化展示。

5 实例分析及系统功能展示

5.1 实例分析

以该地区某配网支路故障为例,如图7所示,将故障设置在A₁、A₂之间说明定位过程。首先启动后台故障分析,给出双屏推图,分别在2个屏上给出故障交互处理界面和故障单线图,同时在推图右下角的状态栏显示事故执行步骤,故障分析完毕后,弹出交互界面。故障信息及处理方案如图8所示。

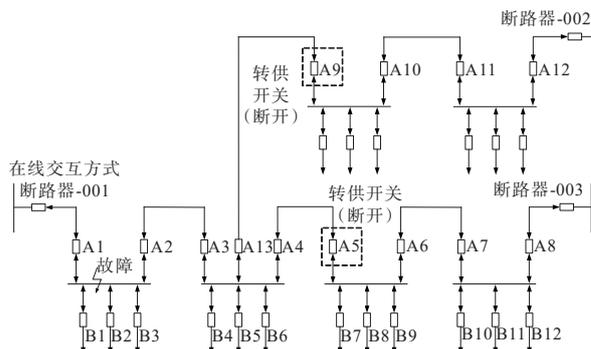


图7 配电网支路故障示意

Figure 7 Distribution network branch fault diagram



图8 故障信息及处理方案

Figure 8 Fault information and processing scheme

辅助操作人员根据交互界面故障信息及给出的故障处理参考方案,点击相应按钮将对应开关开断,隔离故障区域,如图9~11所示;然后根据负荷失电信息,选择最优转供方案,执行负荷转供操作,恢复对非故障区域的负荷供电,如图12~13所示;处理完故障后将故障信息存入历史数据库中,同时清空实时库中的相关操作信息,再将该条线路转为在线运行方式。

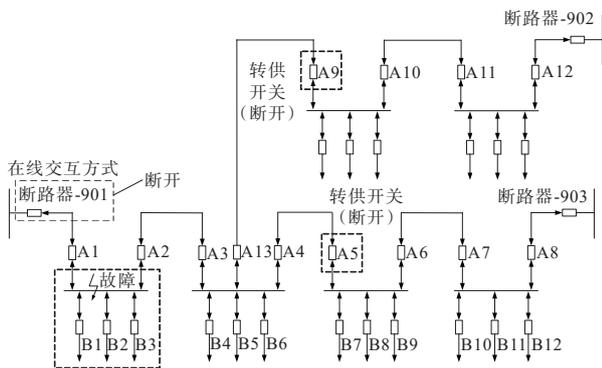


图9 故障上游断路器

Figure 9 Faulty upstream circuit breaker

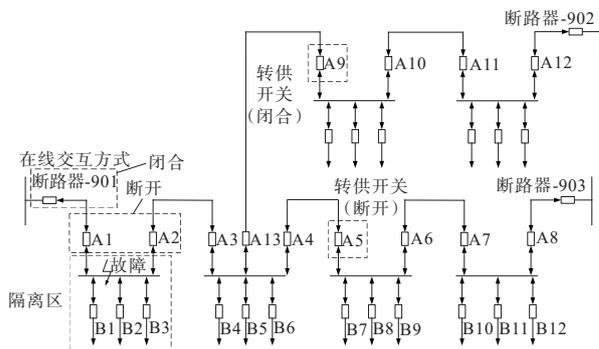


图13 下游供电恢复

Figure 13 Restoration of downstream power supply

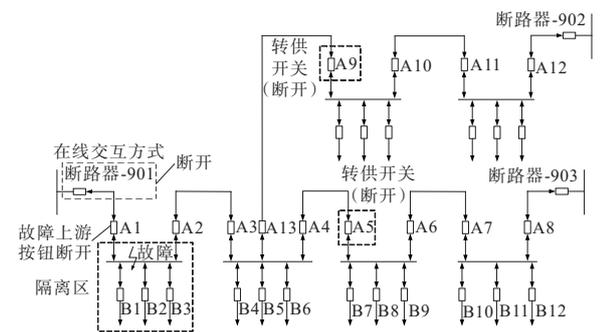


图10 故障上游按钮

Figure 10 Fault upstream button

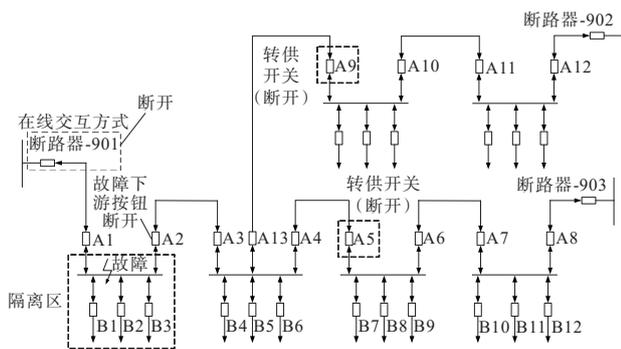


图11 故障下游按钮

Figure 11 Fault downstream button

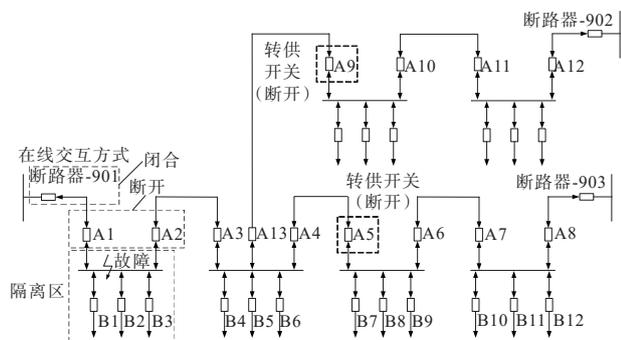


图12 上游供电恢复

Figure 12 Restoration of upstream power supply

5.2 系统功能展示

1) 页面首部。

此界面中通过主动抢修标识可跳转到工作台页面,并显示今日登录总人数、登录总次数等信息,如图14所示。

2) 线路故障定位。

此模块中含有查看当日线路停运详情和标记停电范围,如图15所示;给出故障详情及故障定位推图,如图16所示;实时召测停电台区,如图17所示;生成实时故障分析报告,如图18所示等功能。

3) 异常汇总及地区异常设备数量排行。

该模块能展示所在区域当日和当前线路停运数、支线停运数以及台区停运数,如图19所示。



图14 主动抢修界面

Figure 14 Active urgent maintenance interface

当日支线停电

线路名称: 组织: 国网长沙供电公司国网望城区供电公司

送电状态: 工单来源:

过滤:

序号	地市公司	县公司	供电所	线路名称	停电时间
1	长沙供电公司	望城区供电公司	高乌供电所	关山变308关友线	06-05 08:00
2	长沙供电公司	望城区供电公司	星城供电服务站	戴公庙变316戴...	06-05 08:00
3	长沙供电公司	望城区供电公司	高塘岭供电服务站	高塘岭变352胜...	06-05 08:30

图15 故障情况显示

Figure 15 Fault status display

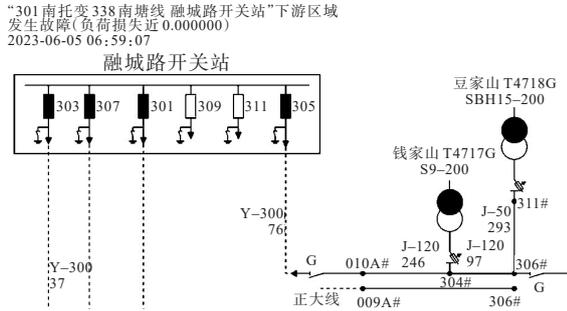


图 16 故障详情及故障区域定位

Figure 16 Fault details and fault area localization

台区名称	召测结果	用户召测结果	操作
南塘钱家山 T4717G	召测成功,台区带电,A相电压:225.6,B相电压:230.7,C相电压:227		台区召测 用户召测(随机)
南塘豆家山 T4718G			台区召测 用户召测(随机)
南塘樟木塘 T4616G			台区召测 用户召测(随机)
关闭	批量台区召测		批量用户召测(随机)

图 17 召测界面

Figure 17 Interrogation and test interface

10 千伏南塘线实时故障分析报告

(配电网数字共享应用中心)

一、线路概况

10 千伏南塘线于 2017 年 01 月 01 日投运,现供带配变 87 户,配变总容量 34 800 kVA,其中公变 63 户、专变 24 户;低压用电客户 1 524 户,其中重要用户 1 户,敏感用户 0 户。

二、实时停电分析

10 千伏南塘线于 2020 年 06 月 11 日 01 时 26 分 18 秒发生实时故障停电,判断依据如下:

1. 实时信号分析

设备名称	设备类型	设备变位信号	设备变位时间	保护动作信号	保护动作时间
南塘豆家山 T4718G	柱上-变压器	配变失电	2020-06-11 01:26:18	过流	2020-06-11 01:26:18
南塘樟木塘 T4616G	柱上-变压器	配变失电	2020-06-11 01:26:18	过流	2020-06-11 01:26:18
南塘樟木塘 T4617G	柱上-变压器	配变失电	2020-06-11 01:26:18	过流	2020-06-11 01:26:18
南塘樟木塘 T4618G	柱上-变压器	配变失电	2020-06-11 01:26:18	过流	2020-06-11 01:26:18

图 18 实时故障分析报告

Figure 18 Real-time fault analysis report



图 19 异常设备汇总

Figure 19 Abnormal device summary

6 结语

基于多维信息融合的配电网主动故障研判系统的开发融合了多个系统的运行数据,能够快速准确地实现故障定位、隔离,恢复非故障区域供电,有利于推动配电网自动化的发展。该系统有以下几方面优势:

- 1) 解决了各系统独立带来的业务管理效率低下、操作不便及数据共享能力不足等问题;
- 2) 可将故障详情及可能的处理方案在供电指挥中心进行展示,减轻了操作人员的负担并能够提高工作效率;
- 3) 系统功能全面、运行可靠、扩展性强且操作维护简便,此外,系统的开发还充分运用了数据库技术和可视化软件技术的优越性,并且具有较好的适用性,方便在其他地区推广和应用。

参考文献:

[1] 朱占春,潘宗俊,唐金锐,等.基于单端暂态能量谱相似性的配电网故障区段定位新方法[J].电力科学与技术学报,2021,36(2):180-191.
ZHU Zhanchun, PAN Zongjun, TANG Jinrui, et al. A novel fault location method for power distribution systems using energy spectrum similarity analysis of single-terminal transient waveform[J]. Journal of Electrical Science and Technology, 2021, 36(2): 180-191.

[2] 黄昱翰,蔡泽祥,潘天亮,等.面向闭环运行配电网的广域保护控制方案[J].电力科学与技术学报,2019,34(2):47-52.
HUANG Yuhan, CAI Zexiang, PAN Tianliang, et al. Research on wide area protection and control scheme for closed-loop distribution network[J]. Journal of Electrical Science and Technology, 2019, 34(2): 47-52.

[3] 谢李为,李勇,罗隆福,等.基于距离矩阵与分支系数的配电网故障定位方法[J].中国电机工程学报,2020,40(7):2180-2191+2397.
XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. Fault Location Method for distribution networks based on distance matrix and branch coefficient[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2180-2191+2397.

[4] 曾祥君,陈磊,喻锴,等.基于配电网双端信息融合的单相断线故障实时监测方法[J].电力科学与技术学报,

- 2020,35(3):12-18.
- ZENG Xiangjun, CHEN Lei, YU Kun, et al. A real time monitoring method for the single-line break fault based on dual-terminal information in the distribution network[J]. Journal of Electrical Science and Technology, 2020,35(3): 12-18.
- [5] 何瑞江,胡志坚,李燕,等.含分布式电源配电网故障区段定位的线性整数规划方法[J].电网技术,2018,42(11): 3684-3692.
- HE Ruijiang, HU Zhijian, LI Yan, et al. Fault section location method for DG-DNs based on integer linear programming[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3684-3692.
- [6] 邱彬,罗添元,宁博,等.基于BAS-IGA的含分布式电源配电网故障定位[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(2):8-14.
- QIU Bin, LUO Tianyuan, NING Bo, et al. Fault location of distribution network with distributed generations based on BAS-IGA[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2021, 33(2): 8-14.
- [7] 王彦国,涂崎,孙天甲,等.基于对等通信的分散式配电网保护与自愈控制系统[J].供用电,2019,36(9):9-17.
- WANG Yanguo, TU Qi, SUN Tianjia, et al. Distributed protection and self-healing system of distribution network based on peer to peer communication[J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(9): 9-17.
- [8] 焦群.建设电力通信网络管理系统[J].电力系统自动化, 2000,24(5):49-53.
- JIAO Qun. Building telecommunication management system for electric power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(5): 49-53.
- [9] 黄小桃,焦群.电力系统通信综合网管系统设计[J].电力系统通信,2018(6):33-37.
- HUANG Xiaotao, JIAO Qun. Design integration telecommunication network management system for electric power system[J]. Telecommunications for Electric Power System, 2018(6): 33-37.
- [10] 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.
- 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.
- [11] 邓丰,李欣然,曾祥君,等.基于波形唯一和一和时一频特征匹配的单端行波保护和故障定位方法[J].中国电机工程学报,2018,38(5):1475-1487.
- 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(5): 1475-1487.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 林舜江,李欣然,李培强,等.电力系统综合负荷建模平台的开发[J].中国电力,2005,38(11):87-91.
- LIN Shunjiang, LI Xinran, LI Peiqiang, et al. Development of load modeling platform for electric power system[J]. Electric Power, 2005, 38(11): 87-91.
- [15] 吴振华.基于GPRS的配电网故障定位系统的研究[D].北京:北京交通大学,2014.
- WU Zhenhua. Research on fault location system of power distribution network based on GPRS[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [16] 李晓喆,张晓辉,李祥胜. SQL Server 2000 管理及应用系统开发[M].北京:人民邮电出版社,2003:17-269.
- LI Xiaozhe, ZHANG Xiaohui, LI Xiangsheng. SQL Server 2000 management and application system development [M]. Beijing: People's Posts and Telecommunications Press, 2003: 17-269.
- [17] KRUGLINSKI D J. Visual C++ 技术内幕(第4版)[M]. 潘爱民,王国印,译.北京:清华大学出版社,1999:27-810.
- KRUGLINSKI D J. Visual C++ technology inside(Fourth Edition)[M]. Translated by PAN Aimin, WANG Cuoyin. Beijing: Tsinghua University College Press, 1999: 27-810.