

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2017.10.017

# 基于多源数据融合的电力系统 故障诊断与评估平台开发

侯仁政<sup>1</sup>, 张 岩<sup>1</sup>, 张小易<sup>2</sup>, 袁宇波<sup>2</sup>

(1. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027; 2. 国网江苏省电力公司 电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

**摘要:** 针对当前电力系统故障数据和信息分布在不同安全分区的问题, 对符合安全防护规定的跨安全分区数据分类、关联和融合技术进行了研究, 提出了基于多源数据融合的电力系统主网和配网故障智能诊断技术。在主网诊断过程中, 充分利用故障状态量、电气量和时序信息等数据, 并结合气象等外部要素情况, 分析了故障原因; 在配网评估过程中, 综合利用电力生产管理系统 (PMS)、调度管理系统 (OMS) 以及能量管理系统 (EMS) 的海量数据, 发展了基于规则推理的配网故障诊断评估技术。并根据江苏电力系统实际情况, 侧重电网运行信息、设备状态信息和环境监测信息深度融合与综合应用, 开展了基于多源数据融合的电网故障诊断平台研究以及故障辅助分析系统的研制。研究结果表明: 该系统综合利用了多源数据的冗余信息, 可更快速和准确地实现故障智能诊断。

**关键词:** 电力系统; 故障诊断; 多源数据融合; 智能诊断

中图分类号: TM711.2; TP24

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)10-1173-07

## Power system fault diagnosis and evaluation platform based on multi-source data fusion

HOU Ren-zheng<sup>1</sup>, ZHANG Yan<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-yi<sup>2</sup>, YUAN Yu-bo<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. Electric Power Research Institute, State Grid Jiangsu Electric Power Corporation, Nanjing 211103, China)

**Abstract:** Aiming at the fault data and information distributed across different security partitions, the data classification, association and fusion techniques, which meet the security requirements, were proposed. The smart diagnosis technique for transmission and distribution networks based on multi-source data fusion was developed. In the diagnosis for the transmission system, different kinds of factors were fully used to analyze the cause of the fault. The factors include the fault status, electric parameters as well as their temporal features and other external factors like meteorology. In the diagnosis for distribution network, massive data was fully used to develop the evaluation technique of the distribution network based on rule reasoning. The data was obtained from power production management system (PMS), operation management system (OMS) and energy management system (EMS). According to the actual situation of Jiangsu power grid in China, the fault diagnosis platform and the fault-assisted analysis system based on multi-source data fusion was developed. The results indicate that the redundancy information of multi-source data can be used to achieve the smart fault diagnosis more quickly and accurately. In this work, the safe and stable operation level of a power system can be improved.

**Key words:** power system; fault diagnosis; multi-source data fusion; smart diagnosis

## 0 引 言

专家系统、神经网络、解析模型、粗糙集、Petri 网等都是电力系统故障诊断的典型方法。基于专家系统

的方法利用保护继电器 (PRs) 和断路器 (CBs) 的动作规则建立知识库, 用警报信息激活相应动作规则, 通过推理得到故障元件, 该方法在一些实际电力系统已经得到应用<sup>[1-3]</sup>。

收稿日期: 2017-01-06

作者简介: 侯仁政 (1990-), 男, 山东新泰人, 硕士研究生, 主要从事电力系统故障诊断方面的研究。E-mail: hrz1227@163.com

然而专家系统存在以下瓶颈:难以获得完备的知识库、诊断速度慢、知识库维护困难、学习能力薄弱、容错能力较差。基于人工神经网络的故障诊断方法使用大量和充分的故障实例作为故障诊断 ANN 模型的训练样本集,运用一定的学习算法对样本集进行训练,不需要对电网配置情况以及继电保护的逻辑进行明确定义,ANN 模型具有自我学习能力强、无需逻辑推理、样本数据越丰富模型越准确等特点。其缺点在于难以形成完备的样本集,当系统结构或保护配置发生变化时需要重新对网络重新组织,重新训练<sup>[4]</sup>。

在基于解析模型的方法中,电力系统故障诊断被表示为优化问题:首先根据故障发生前后电力系统通电区域的对比确定故障区域,列出所有可能的故障元件;然后将可能故障元件的不同组合作为故障假设,计算保护动作和断路器开断信号的实际状态值与期望状态值得差异,采用优化算法求解使差异最小化<sup>[5-7]</sup>。Petri 网能够用来表示离散并行系统,电力系统在故障发生后的一系列动作具有离散并行特点。文献[8]构造了基于多源信息的延时约束加权模糊 Petri 网故障诊断模型,充分利用故障发生后的多种信息,可以处理断路器误动/拒动和报警信号缺失/畸变的情况,诊断结果可靠性更强;文献[9]提出了一种融合时序约束网络的模糊 Petri 网故障诊断模型,通过将 Petri 网库所赋予时间属性,考虑了元件故障、保护和断路器动作的延时约束,并采用模糊加权算法进行推理运算,提高了容错性。粗糙集理论可对数据进行信息约简,获得数据的核心知识,使样本更具代表性,在直流输电系统的诊断中有不错的仿真效果<sup>[10]</sup>。

目前电网运行信息、设备状态信息、环境监测信息分别位于不同安全分区的若干系统,缺乏深度融合与综合应用,有必要研究符合安全防护规定的大容量数据跨区融合技术,开展故障诊断系统研发,并依托智能电网调度技术支持系统 D5000 平台实现基于继电保护故障信息,进行综合分析。

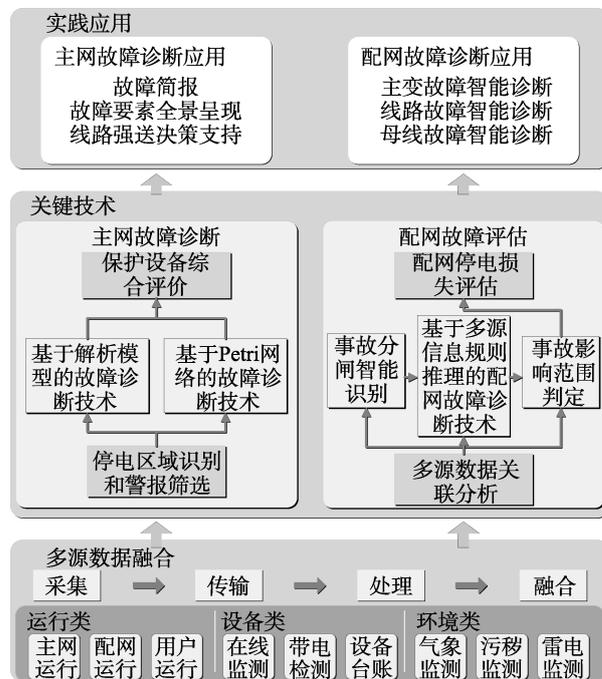
本研究将针对江苏电力系统实际情况,侧重电网运行信息、设备状态信息、环境监测信息深度融合与综合应用,开展基于多源数据融合的电网故障诊断平台研究与开发。

## 1 基于多源数据融合的故障诊断平台框架

多源海量数据融合可以梳理电网运行和故障数据,具体包括数据采集、传输、处理和融合技术。相配套的主网故障诊断和配网故障统计技术的应用研发,具体包括基于解析模型的主网故障诊断技术、基于 Petri 网的

主网故障诊断技术以及基于多源信息推理的配网故障评估技术。

基于多源数据融合的故障诊断与统计平台框架如图 1 所示。



## 2 多源数据融合处理流程

在现代智能电网中,数据来源于多个数据源的异构数据,因此需要研究面向多源异构数据的融合方法。另外,现代智能电网数据来源的维度不同,而多源数据采集及传输技术、海量数据的自动分类技术和多源海量数据融合技术正好可处理这种数据。

### 2.1 多源海量数据采集技术

D5000、OPEN3000、PMS、OMS、在线监测、带电检测、气象监测系统、雷电定位<sup>[11]</sup>等多个系统的数据格式、目标存储或发布方式以及处理频度各有不同,导致数据采集存在困难。从数据的来源来看,存在数据文件(如 txt/xml/xls)、数据库和 Webservice 等多种方式;数据的目标存储或发布方式包含报表(如 xls/doc/pdf)、数据库和 Webservice 等;数据处理频度则包含实时、准实时、周期性(如每小时/天/周)等多种要求。

针对特定数据类型开发专用的解析或处理程序,适用于结构复杂、格式特殊或对性能有很高要求的应用。然而对于普通类型的数据业务,例如 txt、xml、xls 文件解析或常规的数据库处理转换导出,专用程序开发可能存在以下两方面的问题:

(1) 导致大量的重复劳动。各个专用程序除了业务逻辑外, 其他部分存在很大的相似性;

(2) 不便于后期的管理与维护。

为解决上述问题, 本研究搭建了通用数据处理框架, 框架分为公共服务、线程处理、业务逻辑接口 3 个模块。

多源海量数据通用采集框架如图 2 所示。

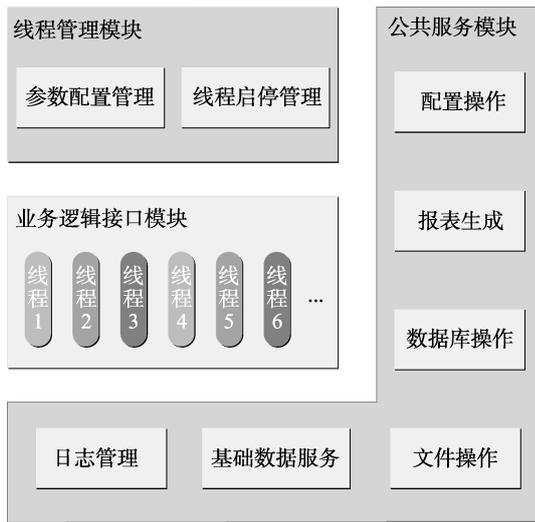


图 2 多源海量数据通用采集框架

多源海量数据通用采集框架分为线程管理模块、业务逻辑接口模块、公共服务模块。线程管理模块通过图形界面实现对数据解析和处理线程的统一管理以及线程周期参数配置管理。业务逻辑接口模块提供了具有线程功能的数据处理基类, 开发人员通过继承该基类并实现 `handleData` 方法进行二次开发来实现业务逻辑。公共服务模块包括数据库操作、文件操作、报表生成、配置操作、日志管理、基础数据服务等子功能, 以支撑其他模块, 或通过接口方式供开发人员调用, 从而简化开发流程, 避免重复劳动。

### 2.2 多源数据安全传输技术

研究符合安全防护规定的大容量多源数据跨安全分区传输技术, 通过提供一种电力二次系统中正反向隔离装置的闭环控制系统, 可以实现信息在正、反向隔离装置之间单向闭环流通。

符合安全防护规定的多源数据传输技术包括: 数据通信技术、报文分割技术、工程维护技术。

数据通信技术包括: 正向数据通道和反向数据通道。

报文分割技术是指在自定义帧格式的基础上切割数据通道中的数据报文。

报文分割自定义帧格式如表 1 所示。

表 1 报文分割自定义帧格式

字节	报文内容	说明
0	Start byte = 68H	起始字节
1	Length	Data 区字节数
2	Type	报文类型
3	...	...
4	...	...
...	...	...
n-2	Data	应用数据
n-1	Check Sum	从起始字节到应用数据区的二进制校验和
n	End byte = 16H	结束字节

工程维护技术是针对正、反向物理隔离装置传输数据的特点, 在正向数据通道和反向数据通道的基础上进行闭环控制。

### 2.3 海量数据的自动分类技术

海量数据的自动分类技术<sup>[12]</sup>从机器学习的角度对海量电网故障数据进行装置逆推分类, 针对装置配置信息、定值等基础特征信息确保电网故障诊断信息系统定位故障的精确性。该技术通过非监督学习解决不同保护功能、不同数目的保护定值下电网故障保护装置产生的海量数据分类, 避免复杂的矩阵计算, 提高计算效率, 进而精确定位电网故障数据中的关键遥信点。

电网故障保护装置为电网故障信息系统带来了海量数据。信息系统不仅需要对电网故障保护装置的运行信息、保护动作信息、整定值信息、断路器动作信息等实现有效集成、分类和分析, 还需要整合各厂家生产的各类电网故障保护装置。电网故障保护装置的非监督学习分类技术, 能够在无样本或少量样本的前提下, 以装置定值对电网故障保护装置进行分类, 进而实现电网故障诊断信息系统精确定位每一套保护装置的动作信息。

本研究海量数据自动分类技术主要包含 3 个技术难点, 即自动分类预处理模型、自动分类判别函数和自动分类算法运算范畴。

### 2.4 多源海量数据融合技术

多源海量数据融合技术主要包括: 异质数据源台账映射、面向拓扑分析的跳闸元件识别、电网事故分闸的数据融合 3 方面。

#### (1) 异质数据源台账映射

异质数据源台账映射以业务数据基线、支线技术为保障, 将分别位于不同安全分区的若干系统的电网运行信息、设备状态信息、环境监测信息加以融合。业务数

据基线是指电网业务中的设备,包括生产控制区 I、II 区的 EMS 台帐设备和管理信息大区 III、IV 区的 PMS 台帐设备。业务数据支线是指电网中的业务系统,如雷电数据、气象数据、污秽监测数据、D5000 中的保信数据、SCADA 数据等。业务数据基线通过自动和手动台帐映射匹配将 EMS 设备台帐与 PMS 设备台帐进行关联,具有两类方法进行整合即。自动匹配每隔一段时间运行一次,而手动匹配作为资产存入数据库,每一次手动匹配增加设备关联的匹配率。业务支线作为属性挂靠在业务基线上,进而确保异质数据源台帐映射。

### (2) 基于拓扑分析的故障元件判别

基于拓扑分析的故障元件判别技术主要对 500 kV 二分之三接线方式下,无法直接定位某一开关设备属于某线路、母线、主变的情况,根据故障设备 ID 和设备名称,通过在电网调度控制系统中对设备的连接关系进行检索,查找与跳闸设备(开关)相连接的两端设备,然后查找设备(线路,母线,主变…)是否为开关或刀闸等连接设备,如果是则继续查找与此次找到的设备相连的设备,直到查找到的设备是线路,母线,主变等,为进一步定位故障范围提供依据。

### (3) 电网事故分闸的数据融合

电网事故分闸的数据融合技术是指在 SCADA 消息总线上捕获事故分闸信号,该信号包含厂站、开关分闸 ID 和名称、发生时间和接收时间。以 SCADA 消息总线上的事故分闸信号为触发条件,分别从二次遥信应用和保信应用中提取遥信 SOE 信息和事故保护信息数据。针对遥信 SOE 数据,提取 5 min 内同一厂站的所有遥信数据,以动作、复归是否成对出现作为判断判断是否有截断数据,若有截断的遥信数据则扩大至 10 min 内同一厂站遥信数据。若无截断数据,则以保护动作、ABC 跳、重合闸等作为依据制作关键遥信点点表,将遥信 SOE 数据与关键遥信点匹配并作检修判定后,匹配的二次遥信数据连接雷电、气象、污秽等数据显示为故障内容。针对保信数据,提取 5 min ~ 0.5 h 之内同一厂站和对端厂站内的故障保信数据,与关键保信点进行匹配,若匹配,则按照一次设备、二次设备等关联关系显示故障内容。

## 3 利用多源数据的电网故障智能诊断技术

本研究根据故障信息的特征和各信息源的特点,提出一种基于分层的故障诊断结构,如图 3 所示。

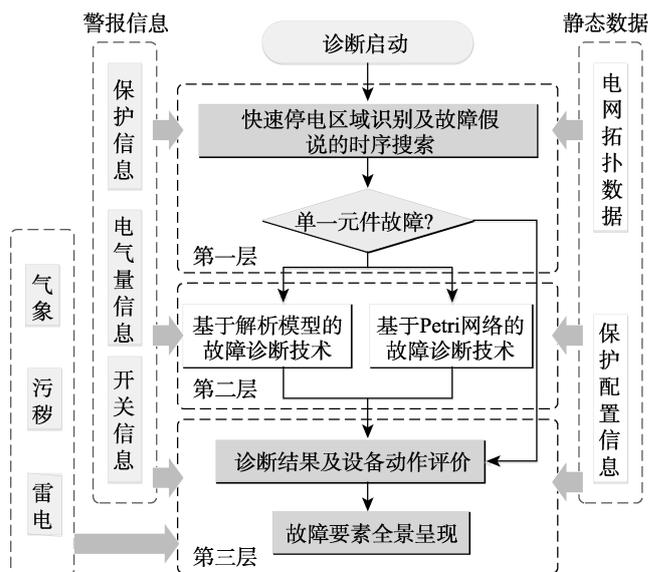


图 3 分层诊断结构

第一层为故障区域识别及故障假说搜索层。首先,由断路器变位信息、保护动作信息与故障后电气量信息相结合对故障情况进行初步判断,识别故障停电区域,划定可能故障元件的集合,同时,利用基于时序规则搜索,获得相应的故障假说集合。

第二层为故障精确诊断层。对于复杂故障,构建不同元件组合的故障假说,利用断路器及保护信号等信息识别故障元件。该层利用了基于解析模型的故障诊断技术<sup>[13]</sup>和基于 Petri 网络的故障诊断技术<sup>[8]</sup>。在确定最优故障诊断结果后,进入第三层。

第三层为诊断结果呈现层。利用上层提供的故障诊断结果,调用故障报告智能生成技术,对保护装置动作及警报进行全面的分析诊断,并进行评价。同时,利用故障要素全景呈现技术将各气象因素与故障相关联,分析故障起因,并为线路强送做技术支撑。

以下以基于解析模型的故障诊断方法<sup>[13]</sup>为例,对利用多源数据的电网故障诊断技术开发进行说明。

### 3.1 基本架构

在故障发生后,警报信息(包括实际继电保护动作警报和断路器跳闸警报)被上传到调度中心,作为故障诊断的基础。首先,利用实时拓扑分析模块识别故障前后的电力系统拓扑结构,确定停电区域,并获取相应的实际继电保护、虚拟继电保护和断路器集合。下面依次介绍保护映射、故障假说和目标函数的形成,以及目标函数值的计算等内容。

基于解析模型的故障诊断基本架构如图 4 所示。

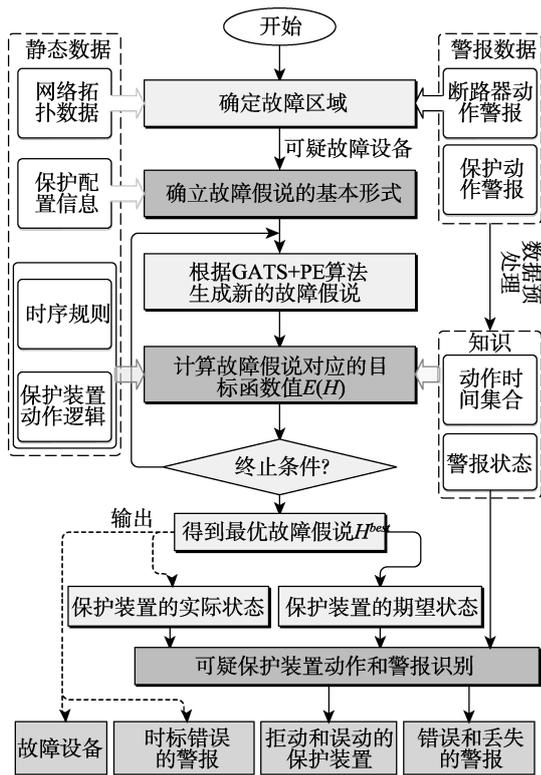


图 4 基于解析模型的故障诊断基本架构

### 3.2 保护映射

本研究基于虚拟保护装置和实际保护装置之间存在的映射关系,在利用冗余信息增强诊断准确性的同时提高诊断效率。虚拟继电保护用于合并针对相同位置或设备并具有功能的实际继电保护,并继承后者的功能;合并可以保留警报的冗余和时序信息,并压缩所建解析模型的求解空间,提高诊断的准确性和计算效率。通过对冗余信息的处理,虚拟继电保护集合能够以较少的元素个数完全映射具有冗余性的实际继电保护集合,并应用于故障诊断。虚拟保护和与其对应的实际保护的实时状态与期望值、警报状态和动作时间集合是相关联的。

### 3.3 故障假说和目标函数

#### 3.3.1 故障假说

一个精心设计的故障假说首先需要能够清楚表示“触发所获得的警报的事件(故障)或原因”。故障诊断就是要发现与实际故障情况一致的故障假说。其次,所设计的故障假说应能够有效利用所能获取的信息,以提高故障诊断的准确性。同时,故障假说应保持简洁,以压缩优化问题的求解空间,提高求解效率。本研究定义的故障假说包括以下信息:(1)失电区域中设备的状态,即其是否故障;(2)虚拟继电保护和断路器的实际状态;(3)警报时标信息的正确性。

#### 3.3.2 目标函数

目标函数反映故障假说的置信度,其取值越小则故

障假说的置信度越高。所构建的目标函数由 3 部分组成,即差异度指标、时序冲突指标和最小集指标。其中,差异度指标反映了保护设备的期望状态与实际状态之间,以及实际状态与警报状态之间的不一致程度;时序冲突指标反映了故障假说中的时序不一致程度;最小集指标的含义为:在其它指标保持相同的前提下,故障假说中所包含的故障设备的数目越小,其为最优解的可能性越高。

在警报预处理和故障诊断阶段,可以对各指标的权重系数进行自适应调整,以提升故障诊断方法的灵活性、适应性和准确性。一般而言,应该对差异度和时序冲突指标给定较大的权重系数,而最小集指标的权重系数可相对较小,以寻求最合理的故障假说。

### 3.4 目标函数的计算

#### 3.4.1 警报预处理

警报预处理的主要功能是将警报状态和动作时间集合与相应的保护设备相关联,保存原始警报的时序信息和冗余信息,为下一步的故障诊断做好准备。时序信息和冗余特性是原始警报信息的两个重要特性。不过,只有经过过滤、处理并转换为特定的知识形式,这些特性才能被方便的利用。经过警报预处理环节,冗余的原始警报信息将被压缩和整合,以便在故障诊断过程中被更好的利用。

#### 3.4.2 保护设备动作逻辑

本文对现有的保护设备动作逻辑进行了提炼和创新,以便适应不同的保护配置和运行方式。主要包括:

- (1)在主保护动作逻辑中考虑了纵联保护策略的影响;
- (2)将近后备保护和远后备保护的逻辑进行了重新梳理,并整合为通用的后备保护动作逻辑,以便考虑不同保护之间的配合;
- (3)重新设计了断路器失灵保护的逻辑,以便考虑不同的运行方式。

#### 3.4.3 权重系数调整

前已述及,目标函数中的权重系数的设置具有一定的灵活性,可以针对不同的系统情况和具体案例进行适当调整。调整权重时需要着重考虑两方面因素:警报信息之间的时序关联和保护装置实际状态之间的逻辑关联。

#### 3.4.4 时序冲突指标的建立

警报序列中的时序信息不仅包含警报之间的关联特性,也隐含警报之间的时序冲突。当某两个保护设备动作,但它们的警报之间的时间差不匹配时,则有可能存在时间冲突。时序冲突指标具有下述特征:(1)识别警报信息中的错误时标;(2)抑制误警报信息对故障诊断结果的影响;(3)防止故障设备的漏诊断。

时序冲突指标的构建主要包括两步:(1)构建时序冲突集;(2)解决时序冲突。如果能够识别出某事件警

报的时标错误,则可解决与该事件相关的时序冲突。故障假说的时序冲突指标越小,则该假说为最优故障假说的可能性越高。

### 3.5 故障报告智能生成技术

本研究采用 GATS+PE 算法求解所形成的无约束 0-1 整数规划问题,最终得到最优解。对误动/拒动、漏报/误报和时标错误的识别方法如表 2 所示。

表 2 可疑动作及警报识别

指标	可疑动作及警报识别
$r_i = 0 \ \& \ r_i^* = 1$	保护设备 $d_i$ 拒动
$r_i = 1 \ \& \ r_i^* = 0$	保护设备 $d_i$ 误动
$r_i = 0 \ \& \ r_i' = 1$	保护设备 $d_i$ 警报误报
$r_i = 1 \ \& \ r_i' = 0$	保护设备 $d_i$ 警报漏报
$f_i = 1$	保护设备 $d_i$ 警报时标错误

$r_i^*$ ,  $r_i$ ,  $r_i'$ — $d_i$  的期望状态、实际状态和警报状态;  $f_i$ — $d_i$  的警报时标标志

因此,主网故障诊断的诊断结果包括故障设备、继电保护系统动作和警报综合评价。利用该诊断结果,可为线路强送决策和故障要素全景呈现提供支持。

## 4 基于规则推理的配网故障诊断评估技术

首先本研究对故障记录索引进行信息筛选、分类,通过保护关键字、遥测掉零判据进行自动判断,形成故障分析结果,由此汇总成的故障记录结果可以进一步进行统计分析和报表生成。

配电网故障智能诊断统计流程如图 5 所示<sup>[14]</sup>。

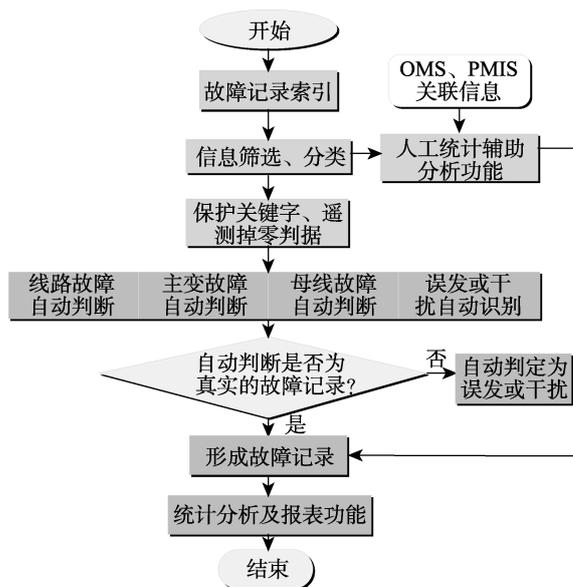


图 5 配电网故障智能诊断统计基本流程

### 4.1 配电网故障记录索引判别

配电网故障记录索引判别模型如图 6 所示。判别流程主要有 4 步:确定故障记录索引来源、排除错误信号、设置过滤条件、OMS、PMIS 核对。

### 4.2 统计判据

在进行统计判断时,采用的故障判据包括基本判据(保护关键字判据、遥测掉零判据)和专项判据(线路故障判据、主变故障判据、母线故障判据和“误发或干扰”判据)。

故障主要判据包括:基于保护关键字和电流遥测掉零的基本判据;分别针对线路、主变、母线故障自动判断的专用判据。



图 6 配电网故障记录索引判别模型框图

### 4.3 人工统计辅助分析功能

在一些故障过程特别复杂、故障关键信息缺失、检修信号干扰等情况下,需要结合 OMS、PMIS 中的信号进行人工统计辅助分析<sup>[15]</sup>。

## 5 系统研发与应用

根据前期的理论研究,笔者研发了基于多源数据融合的电网故障辅助分析系统。该系统分为了主网故障诊断子系统和配网故障统计分析子系统。系统基于大数据

平台开发完成,集故障诊断、统计分析于一体,界面友好,功能强大,目前已实现实用化。系统覆盖了江苏电网 10 kV~500 kV 的 4 000 多个变电站和 30 000 多条线路,日均处理故障数百条(使用辅助数据 10 余万条)。主网故障诊断子系统在传统电力系统故障诊断功能的基础上还集成了二次遥信数据、SOE 数据、雷电、污秽、气象等多源数据,并将这些数据以图形化的方式展示,监控员可以方便地查看各类数据,以此确定故障发生的具体原因并采取相应的解决方案。配网故障诊断子系统该系统通过对配网故障及其相关辅助数据的自动采集与智能判别,缩短配网故障判别的时间。

该系统大幅地提高了故障分析和处理的效率,原来人工处理一条故障平均需要 3 min~5 min,现在缩短至 20 s 以内。该系统根据确定的故障诊断结果,对故障综合信息进行检测,为运行及检修人员对保护装置、录波装置、安全自动装置等设备的动作行为做评价提供参考。

## 6 结束语

针对电力系统的多源数据,笔者提出了多源数据融合处理技术,研究了基于多源数据的主网故障智能诊断,研究了基于规则推理的配网故障诊断技术。

针对江苏电网实际情况,开展了基于多源数据融合的电网故障辅助分析系统的研制。该系统大幅提高了故障分析和处理的效率,对于系统事故后快速恢复供电以及维持系统安全稳定运行具有重要意义。

### 参考文献(References):

- [1] LEE H J, AHN B S, PARK Y M. A fault diagnosis expert system for distribution substations[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2000, 15(1): 92-97.
- [2] MIAO H, SFORNA M, LIU C C. A new logic-based alarm analyzer for on-line operational environment[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 1996, 11(3): 1600-1606.
- [3] WEI L, GUO W, WEN F, et al. An online intelligent alarm-processing system for digital substations[J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 2011, 26(3): 1615-1624.
- [4] HUANG Y C, YANG H T, HUANG K Y. Abductive network

model-based diagnosis system for power transformer incipient fault detection[J]. **IEEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution**, 2002, 149(3): 326-330.

- [5] 文福拴, 韩祯祥, 田 磊, 等. 基于遗传算法的电力系统故障诊断的解析模型与方法——第一部分: 模型与方法[J]. **电力系统及其自动化学报**, 1998, 10(3): 1-7.
- [6] GUO W, WEN F, LEDWICH G, et al. An analytic model for fault diagnosis in power systems considering malfunctions of protective relays and circuit breakers[J]. **IEEE transactions on power delivery**, 2010, 25(3): 1393-1401.
- [7] 郭文鑫, 文福拴, 廖志伟, 等. 基于时序约束网络的电力系统在线警报处理解析模型[J]. **电力系统自动化**, 2009, 33(21): 36-42.
- [8] 吴文可, 文福拴, 薛禹胜, 等. 基于多源信息的延时约束加权模糊 Petri 网故障诊断模型[J]. **电力系统自动化**, 2013, 37(24): 43-53.
- [9] 张 岩, 张 勇, 文福拴, 等. 容纳时序约束的改进模糊 Petri 网故障诊断模型[J]. **电力系统自动化**, 2014, 38(5): 66-72.
- [10] 张建明, 曾建武, 谢 磊, 等. 基于粗糙集的支持向量机故障诊断[J]. **清华大学学报: 自然科学版**, 2007, 47(S2): 1774-1777.
- [11] 李 鹏, 张小易, 黄浩声, 等. 基于雷电信息的电网故障诊断系统研究[J]. **江苏电机工程**, 2014, 33(2): 17-21.
- [12] LI Bin, GUO Ya-juan, WU Yi, et al. An unsupervised learning algorithm for the classification of the protection device in the fault diagnosis system[J]. **China International Conference on Electricity Distribution**, 2014, 144(3): 817-823.
- [13] ZHANG Y, CHUNG C Y, WEN F S, et al. An analytic model for fault diagnosis in power systems utilizing redundancy and temporal information of alarm messages[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2016, 31(6): 4877-4886.
- [14] 文乐斌, 张小易, 袁宇波. 基于 SCADA 实时数据的配电网故障智能诊断统计系统研究[J]. **华东电力**, 2013, 41(12): 2514-2517.
- [15] 陈锦铭, 朱卫平, 郭雅娟, 等. 配网故障辅助分析系统的设计与应用[J]. **电力信息与通信技术**, 2015, 13(6): 81-86.

[编辑: 张 豪]

### 本文引用格式:

侯仁政, 张 岩, 张小易, 等. 基于多源数据融合的电力系统故障诊断与评估平台开发[J]. **机电工程**, 2017, 34(10): 1173-1179.

HOU Ren-zheng, ZHANG Yan, ZHANG Xiao-yi, et al. Power system fault diagnosis and evaluation platform based on multi-source data fusion [J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2017, 34(10): 1173-1179.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>