

基于知识库与全景图像匹配算法的母线保护装置故障三维分级检测方法

沈梓正[†], 李海勇, 田君杨, 黄超, 黄鹏飞, 蒋连钊

(广西电网有限责任公司 电力调度控制中心, 广西 南宁 530001)

摘 要:研究了基于知识库与全景图像匹配算法的母线保护装置故障三维分级检测方法,合理检测母线保护装置故障,保障母线保护装置安全稳定运行。将失败案例、故障排除手册等信息作为知识库构建层级的理论依据,设计关系型知识;通过全景图像采集、特征提取与匹配等操作设计三维模型索引知识,构建母线保护装置知识库;在推理机中引入模糊假言推理算法,获取相应的故障诊断结果;在三维可视化层级中使用 PHP 语言,搭建 Web 服务器,设计三维可视化后端程序,呈现故障检测的三维可视化结果。实验结果表明:该方法可有效实现母线保护装置故障的三维分级检测,故障检测结果与实际故障状况一致,可更好地满足实际工作需要。

关键词:知识库;全景信息;图像匹配算法;母线保护装置;三维分级;故障检测

中图分类号: TP391

文献标识码: A

Three-dimensional Hierarchical Fault Detection Method for Bus Protection Device Based on Knowledge Base and Panoramic Image Matching Algorithm

SHEN Zizheng[†], LI Haiyong, TIAN Junyang, HUANG Chao, HUANG Pengfei, JIANG Liandian

(Power Dispatching Control Center of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Nanning, Guangxi 530001, China)

Abstract: Research a three-dimensional hierarchical fault detection method for bus protection devices based on knowledge base and panoramic image matching algorithm, reasonably detect bus protection device faults, and ensure the safe and stable operation of bus protection devices. Using information such as failure cases and troubleshooting manuals as the theoretical basis for building a hierarchical knowledge base, design relational knowledge; Design 3D model index knowledge through panoramic image acquisition, feature extraction, and matching operations to build a knowledge base for bus protection devices; The fuzzy hypothetical inference algorithm is introduced into the inference engine to obtain corresponding fault diagnosis results; In the 3D visualization level, PHP language is used to build a Web server, design a 3D visualization back-end program, and present the 3D visualization results of fault detection. The experimental results show that this method can effectively achieve three-dimensional hierarchical fault detection of busbar protection devices, and the fault detection results are consistent with the actual fault conditions, which can better meet the actual work needs.

Key words: knowledge base; panoramic information; image matching algorithm; bus protection device; three-dimensional classification; fault detection

在发电厂以及变电站日常工作中,母线发挥着十分关键的作用。当发电厂或变电站的母线出现故障后,若不能及时对故障执行有效合理的切除操作,将对发电厂或变电站的相应电力设备造成非常严重的破坏,从而影响电力系统的安全稳定性,迫使发电厂或变电站停止工作,甚至还会造成严重的电力事故^[1-3]。母线保护装置作为保障电力系统安全可靠运行的关键电力设备,对维护电网安全具有非常关键的现实意义^[4,5]。因此,提出一种合适的母线保护装置故障检测方法,是电力安全领域研究的重要方向。

针对上述问题,国内外学者进行了大量的研究。如戴志辉等研究的基于变权重模糊综合评判法的线路保护装置故障检测方法^[6]、李铁成等研究的基于动态优化马尔可夫链的线路保护装置故障检测方法^[7]。前者通过有效提取母线保护装置的主要影响因素,完善用于母线保护装置状态监测工作的评价指标集合。在利用极值法完成各指标的标准化工作后,充分利用层次分析法以及熵值法优势对组合权重实施合理确定,并以所获权重为基础,将变权法应用于母线保护装置状态检测工作中,用于对各指标系数执行有效的调整操作。与此同时,使用半梯半岭型隶属函数分布模型对模糊关系矩阵执行有效求解操作,并对所获模糊矩阵与三角分布模型实施合理对比,最终借助加权平均算子完成对母线保护装置状态的合理检测。后者通过灰色粒子群支持向量机算法对母线保护装置失效率函数执行较为准确的计算操作,并利用所获结果对马尔可夫链中各运行状态转移概率实施动态修正,最终实现对母线保护装置未来运行状态的有效预测。二者均可实现母线保护装置故障检测,但是不仅在母线保护装置故障检测的效率以及准确性方面存在一定欠缺,并且也无法通过可视化方式对相应的故障诊断结果进行合理呈现。

在构建母线保护装置模糊知识库时,除设计母线保护装置关系知识外,通过合理方式设计相应的母线保护装置三维模型索引知识,可在利用合适的推理策略完成母线保护装置故障检测的同时,将所获故障检测结果进行合理可视化呈现,以便工作人员掌握故障严重程度,采取积极合理的措施对故障实施相应处理,从而保障整个电力系统的安全稳定性。为此,本文提出基于知识库与全景图像匹配算法的母线保护装置故障三维分级检测方法,更好地满足实际工作需要。

1 母线保护装置故障三维分级检测

1.1 母线保护装置故障三维分级检测总体架构

在检测母线保护装置故障的过程中,会涉及多种技术参数,例如:接入方式(包括电流式和电压式两种接入方式)、保护等级(I类、II类或III类)、判据类型(过流、过电压、欠电压、位移等)、检测能力(检测故障位置、类型、电流大小)、响应速度、可靠性与精度。而如何在最短时间内根据故障检测技术参数检测出母线保护装置故障,并获取有效的解决方案,保证母线保护装置长期稳定运行,充分发挥其效用,是保障电力系统安全性的关键,对提升电力系统安全性具有非常重要的现实意义。本文为充分迎合这一需求,提出基于知识库与全景图像匹配算法的母线保护装置故障三维分级检测方法,方法总体架构如图1所示。

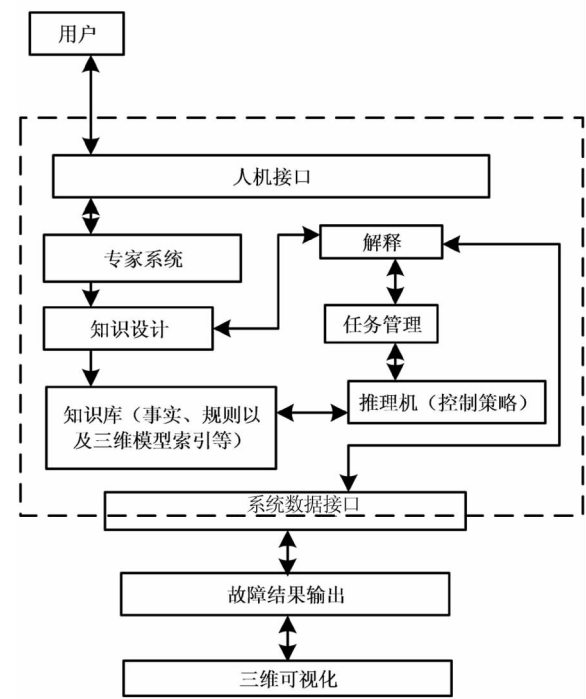


图1 故障三维分级检测总体架构

在本文中,对母线保护装置故障的三维分级检测主要通过知识库构建、推理控制、三维可视化三个层级来完成。在使用恰当方式完成知识设计工作后,将所获知识进行分类整理,构建成信息量巨大的知识库,再通过推理机中使用的模糊推理方法,将知识库中存储的母线保护装置故障诊断知识作为模糊推理的有效依据,按用户提供的故障事实或证据,实施有效的推理,获取相应的故障诊断结果以及故障原因,并将所获故障诊断结果进行合理

的三维可视化呈现,便可完成相应的母线保护装置故障诊断工作。

1.2 母线保护装置知识库构建层级

知识库作为母线保护装置故障三维分级检测较为核心的部分,其获取知识质量的好坏以及知识的数量等直接关系到母线保护装置故障诊断的准确性以及效率^[8]。本文中,用于母线保护装置知识库构建的知识与以往不同,包含关系型数据与三维模型索引数据两部分。其中,关系型数据主要来源于母线保护装置各系统的失败案例、参数指标以及母线保护装置故障排除手册等,在收集完这些信息后,以产生规则样式的表征形式将其存储于关系型知识数据库中,作为母线保护装置故障模糊推理的可靠依据;三维模型索引数据主要是通过采集母线保护装置各部分的二维图像,经过图像预处理、特征匹配等操作,形成母线保护装置各部分三维模型以及整体三维模型得到的,在完成三维模型索引数据采集工作后,以索引形式存储于三维模型索引知识数据库中,以待使用,用作对母线保护装置故障诊断结果实施合理可视化,获取母线保护装置全景信息的可靠依据。

1.2.1 关系型知识设计

母线保护装置关系型知识通常以母线保护装置故障现象、原因、参数指标、行动规则表以及母线保护装置故障原因与参数关系矩阵表、最终结论表为主要构成^[9,10]。在实际的母线保护装置故障现象表制作工作中,应最大限度通过专家先验知识,采集母线保护装置故障现象,并使用合理的方式对母线保护装置所在系统执行可靠的标记操作。表中应包含母线保护装置故障现象的名称以及编号、所在系统的编号以及可信度等属性信息;在进行母线保护装置故障原因表制作时,由于能够导致母线装置某一类故障的原因可能有很多种,而各原因的描述方式又可能各不相同,因而要给予充分的描述与标记;在进行母线保护装置参数指标表制作时,主要是将母线保护装置的工作环境信息、母线保护装置的技术参数以及各参数在相应等级条件下产生作用的权重进行相应存储;在进行母线保护装置行动规则表制作时,主要是将引发母线保护装置故障的因素对应的相应结论标记为相应的动作代码,这样在推理机完成相应的母线保护装置故障诊断工作后,便可及时找到相应的故障解决方案;在进行母线保护装置故障原因与参数关系矩阵表制作时,专门对母线保护装置故障因素受母线保护装置各技术参数影响的可信程度以及权重进行了合理

设计,能够获取到故障产生后母线保护装置参数的变化状况;在制作母线保护装置结论表时,对获得结论的相应行动代码实施了合理设计,可获知该结论产生的可信程度以及权重信息,从而确定其是否是母线保护装置故障诊断工作的最终结果。

1.2.2 母线保护装置三维模型索引知识设计

为了有效辅助专家对母线保护装置故障执行合理诊断工作,使对母线保护装置故障定位能够有一个清晰明了的显示,本文在进行母线保护装置知识库构建时,在对母线保护装置结构以及物理特征实施有效研究基础上,通过合适的方式以及相应工具构建了母线保护装置三维可视化模型,并在母线保护装置三维可视化模型构建完成后,为其各个部分建立了相应的索引项。当经过合理推理获得相应的故障诊断结果后,将所获故障诊断信息输入到母线保护装置三维可视化模型中,可以很直观地看出母线保护装置发生相应故障的位置,从而完成对母线保护装置相应故障的指示工作。

由于立体视觉法在设备零部件三维模型重建方面具有显著优势,可更为准确地完成设备零部件三维模型构建操作,为此,本文在进行母线保护装置三维模型索引知识设计时,采用立体视觉方法构建母线保护装置主要零部件三维模型。具体的模型构建流程可归结为:

(1)双目立体视觉摄像机标定。在利用立体视觉方法完成相应的设备零部件三维模型构建工作时,获取合理的相机参数是关键^[11]。因而本文使用具有较好摄像机标定效果的张正友摄像机标定方法对用于采集母线保护装置各主要零部件图像的双目立体视觉摄像机实施合理标定,以便在后续工作中,能够将母线保护装置各主要零部件二维图像中的特征点更为准确地置于相应的三维模型中。

(2)母线保护装置主要零部件全景二维图像采集与预处理。因 FPGA 芯片具备超强的数据处理与控制能力^[12,13],故本文使用基于 FPGA 的图像采集技术完成母线保护装置主要零部件全景二维图像采集工作。为使所采集全景图像更适应计算机程序,能够更快速地完成相应的三维模型构建操作,在采集工作完成后,利用下式对采集全景图像实施灰度化并使用中值滤波方法对其进行噪声滤除。

$$G_r = \frac{299}{1000}R + \frac{587}{1000}G + \frac{144}{1000}B \quad (1)$$

其中,灰度值用 G_r 标记;红、绿、蓝三种颜色的分量分别用 R 、 G 以及 B 标记。

(3)全景图像特征点提取与匹配。在全景图像特征点提取与匹配领域,尺度不变特征变换算法是较具优势的一种特征点提取与匹配算法。故本文采用该方法完成母线保护装置主要零部件全景图像特征点提取与匹配工作。具体的全景图像特征提取与匹配过程可归结如下:构建合适的高斯差分金字塔用于表征母线保护装置主要零部件全景图像上的像素点;判断母线保护装置主要零部件全景图像的像素点是否是极值点,若是,则将其视为中心,执行特征描述符生成操作,特征描述符中包含若干的特征向量,可显著增强特征匹配工作的稳定性以及容错性;将母线保护装置主要零部件全景图像极值点特征向量所拥有的欧式距离值当作特征点间相似性的有效度量标准,在通过双目立体视觉摄像机右侧摄像头获得的母线保护装置主要零部件全景图像 B 中,找出与通过双目立体视觉摄像机左侧摄像头获得的母线保护装置主要零部件全景图像 A 中某个极值点欧式距离最近的两个极值点,若在两个极值点中,距离最小值与距离次小值间的比值低于所设阈值,则完成一对全景图像匹配点的获取工作。

(4)母线保护装置主要零部件全景图像特征点三维坐标求解。在经步骤(3)操作,获取相应的母线保护装置全景图像特征点后,使用合理的全景图像分割技术,对全景图像实施有效的分割操作,获取有效的全景图像前景。采用合理的方式提取前景边缘信息,这样就可剔除母线保护装置主要零件轮廓外的特征点,获得所有在母线保护装置零部件上的特征点。这些特征点三维坐标是通过双目立体摄像机左右相机的成像模型经过合理推导操作获得的,具体可通过下式进行描述。

$$\begin{cases} X_d = \frac{Z_d(u_1 - x_0)}{f_x} \\ Y_d = \frac{Z_d(v_1 - y_0)}{f_x} \\ Z_d = \frac{[r_1(x_0 - u_2) - f_x r_1] \frac{u_1 - x_0}{f_x}}{f_x t_1 + t_3(x_0 - u_2)} + \frac{[r_2(-x_0 + u_2) - f_x r_2] \frac{v_1 - y_0}{f_y}}{f_x t_1 + t_3(x_0 - u_2)} - \frac{f_x r_3 + r_9(u_2 - x_0)}{f_x t_1 + t_3(x_0 - u_2)} \end{cases} \quad (2)$$

其中, X_d 、 Y_d 、 Z_d 分别标记的是特征点在空间中的横、纵轴以及 Z 轴坐标;母线保护装置全景图像主点的图像坐标系的横轴以及纵轴坐标分别

用 x_0 、 y_0 标记;双目摄像机左右两个相机的焦距分别用 f_x 、 f_y 标记;左侧相机特征点的像素横、纵坐标分别用 u_1 、 v_1 标记;右侧相机特征点的像素横、纵坐标分别用 u_2 、 v_2 标记; r_1 、 r_2 、 r_3 以及 r_9 分别标记的是旋转矩阵中的第一、第二、第三以及第九旋转向量; t_1 、 t_3 标记的是平移矩阵中的第一、第三向量。

(5)母线保护装置特征点三角剖分。将获得的 空间中的母线保护装置特征点进行有效的投影,将其投至世界坐标系所在 XOY 平面上,并在该面上执行母线保护装置特征点三角剖分操作,在三角剖分工作完成后,使用相应的计算机程序对所获三角剖分结果实施空间点还原,之后通过执行有效的贴图操作便可完成母线保护装置主要零部件三维模型构建。

利用上述步骤将母线保护装置各主要零部件三维模型构建完成后,利用合适的计算机程序对各母线保护装置零部件三维模型执行合理的装配操作,组合成母线保护装置整体三维模型,再利用 Echart 中的函数 API 实施母线保护装置三维模型变化以及相关的数据显示,这样在为母线保护装置各部分三维模型添加完相应的索引编码后,应用本文方法检测出的母线保护装置故障,便可直观地展现在工作人员面前,以便工作人员能够随时进行查看,获知母线保护装置故障全景信息,更好完成相应的实际工作。

1.3 母线保护装置故障检测模糊推理层级

在完成母线保护装置故障知识库构建工作后,母线保护装置故障检测工作需要通过推理机使用合理的推理算法实现。模糊推理方法是一种基于模糊逻辑理论的推理方法,可以有效地解决复杂问题,且模糊推理算法较之其他推理算法,推理误差较小^[14,15],在故障检测方面具有较强的优越性。因而本文在推理机中使用模糊假言推理算法,将母线保护装置故障检测的经验知识和专业知识整合归纳,形成相应的模糊规则库。选择有代表性、关键性的参数作为输入变量,例如母线保护装置的电流、电压、频率等。确定与输入变量相关的输出变量,例如故障类型、故障位置等。通过模糊化方法将输入变量转换成模糊语义变量,再将模糊输出变量转换成实际的输出变量,将烦琐的计算工作自动化,有效地提高了母线保护装置故障检测的准确性和可靠性,更为高效准确地完成母线保护装置故障检测工作。

需要注意的是,在构建完母线保护装置故障知

识库后,为能够充分满足模糊假演推需求,所构建的母线保护装置故障知识的表达形式通常由两部分构成,前一部分是对母线保护装置故障现象的描述,后一部分则为可信度以及权重。其中,母线保护装置故障规则知识的描述方式较之其他故障知识,有所不同,其描述方式用公式可表示成:

$$\text{IF } X \text{ is } A \text{ THEN } Y \text{ is } C \quad (3)$$

其中, X 、 Y 分别表示的是母线保护装置故障征兆向量与母线保护装置故障原因向量; A 、 C 分别表示的是论域 U 、 V 上的模糊子集,可以表示母线保护装置故障推理分析要素。

在实际的工作中,当触发母线保护装置故障知识库中的某一个规则后,模糊推理机就会利用模糊假言推理算法实施相应的推理操作,分析母线保护装置的故障规则知识,初步确认故障方向。在利用模糊假言算法进行推理的过程中,会根据模糊知识表现形式,通过扎德法对模糊关系执行合理构建操作,描述母线保护装置故障推理分析要素的形成过程,要素间的模糊关系可描述如下:

$$\begin{cases} A = \int h_A(h)/h \\ C = \int h_C(q)/q \end{cases} \quad (4)$$

其中, h 表示的是 A 中的一个故障元素; $h_A(h)$ 表示的是 h 元素的模糊隶属度; q 表示的是 C 中的故障元素; $h_C(q)$ 表示的是 q 元素的模糊隶属度。

基于此,对故障要素间的模糊关系进行深入分析,并将母线保护装置故障因数代入到分析过程中,以此确定推理变量,如故障类型、故障位置等。根据式(4)可作出如下定义:

$$\begin{cases} R_m = \int_{U \times V} \frac{\{(h_A(h) \wedge h_C(q) \vee [1 - h_A(h)])\}}{(h, q)} \\ R_A = \int_{U \times V} \frac{\{(1 \wedge [1 - h_A(h)] + h_C(q)\}}{(h, q)} dh \end{cases} \quad (5)$$

其中, R_m 为母线保护装置故障类型、 R_A 为母线保护装置故障位置; (h, q) 表示的是 h 元素与 q 元素之间产生的二元模糊关系,可通过模糊关系推算出母线保护装置故障因数。

根据上述讨论以及公式,可在确认推理变量后获得两个故障因素输入变量(即模糊语义变量)的推理公式,具体描述如下:

$$\begin{cases} C' = A' \\ R_m = \int_{U \times V} \frac{\{h'_A \wedge [h_A(h) \wedge h_C(q) \vee (1 - h_A(h))]\}}{q} \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} C' = A' \\ R_A = \int_{U \times V} \frac{\{h'_A \wedge [1 \vee (1 - h_A(h) + h_C(q)) + h_C(q)]\}}{q} \end{cases} \quad (7)$$

其中, A' 、 C' 分别表示的是对 A 、 C 执行语言限制添加操作后获得的模糊集,代表母线保护装置的电流、电压、频率等输入变量间的模糊关系; h'_A 表示的是 A' 的模糊隶属度。

式(6)描述的是当推理变量为故障类型时的推理过程,式(7)描述的是当推理变量为故障位置时的推理过程。在实际工作中,根据上述推理公式执行有效的推理操作,将输入变量转换成模糊语义变量,再将模糊输出变量转换成实际的输出变量,便可获得相应的母线保护装置故障诊断结果。

1.4 母线保护装置故障三维可视化层级

在经过上一小节的模糊推理输出有效的母线保护装置故障诊断结果后,想要对所获检测结果实施可视化,只依靠母线保护装置故障知识库中的母线保护装置三维模型索引知识是行不通的,必须借助一定的后端程序。在本文中母线保护装置故障三维可视化后端程序的构建工作是通过使用 PHP 语言并搭建 Web 服务器实现的,具体的母线保护装置故障三维可视化过程如图 2 所示。

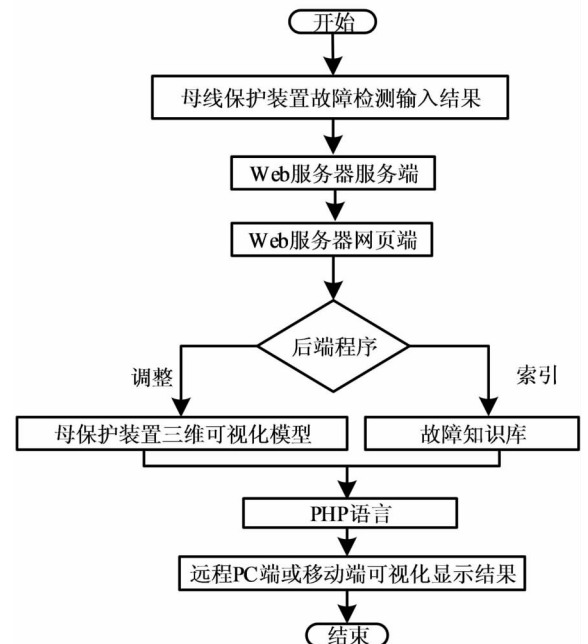


图 2 母线保护装置故障三维可视化流程

2 实验与分析

实验以坐落于某市 D 区的某 220 kV 变电站中的母线保护装置为实验对象,应用本文方法对其实施母线保护装置故障三维分级检测,验证本文方法有效性。据悉,该变电站于 2020 年 1 月完工投入使用,建设有 8 台 240 MV 的主变压器,受容量值高达 19200 MV,是 该市最大变电站,承载了 该市大部分城区的供电量。若母线保护装置发生故障,不能对母线实施有效保护,一旦发生变 电事故,将对城区供电造成非常不利影响。母线保护装置安装时,各项指标均符合出厂要求,相关参数情况如表 1 所示。

表 1 汽轮发电机组参数状况

参数信息	参数值
母线保护装置型号	SG-B750
保护范围	10kV~1000kV 电压等级母线保护
交流输入回路电压精确工作范围	0.2V~200V
交流输入回路电流精确工作范围	0.04 In~40 In
模拟量测量精度	低于±2%
差动整组动作时间	低于或等于 20 ms
后备整组动作时间	低于或等于 40 ms
模拟量输入	80 路
开关量输入	192 路
故障录波	128 次
事件记录	500 次
发送功率	-20~14dBm

图 3 与图 4 分别是应用本文方法对该母线保护装置实施合理母线保护装置故障三维分级检测,获得的母线保护装置故障三维分级检测结果以及通过图 3 中“More”按钮进入的相应母线保护装置故障解释界面。

从图 3 与图 4 可以看出,应用本文方法可以实现母线保护装置故障三维分级检测,获得相应的母线保护装置检测结果与故障解释,并可视化呈现故障检测结果,同时给出修复指导建议,能够有效满足实际工作需要。

为进一步验证本文方法有效性,不考虑其他年份本文方法的应用情况,仅设置 2021 年间应用本文方法对该母线保护装置实施有效故障检测。由于母线保护装置故障类型较多,本文仅针对 5 种常

见的故障类型进行检测,获得的故障检测结果与真实状况的对比表具体如表 2。



图 3 母线保护装置故障三维分级检测结果

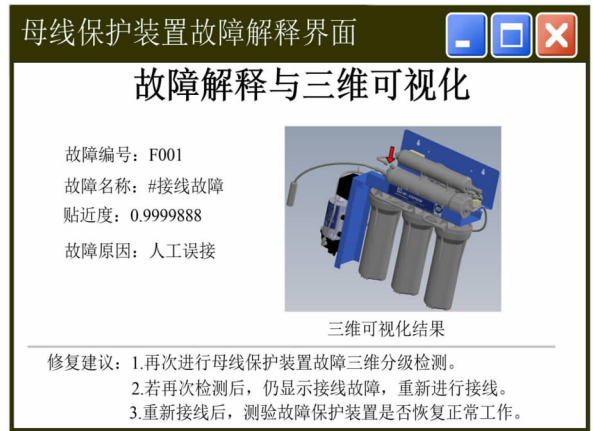


图 4 母线保护装置故障解释界面

表 2 母线保护装置故障三维分级检测结果

日期	检测结果	真实故障类型
2021/01/01-31	断路器双重失灵	断路器双重失灵
2021/02/01-28	接线故障	接线故障
2021/03/01-31	差动元件故障	差动元件故障
2021/04/01-30	接线故障	接线故障
2021/05/01-31	通信元件故障	通信元件故障
2021/06/01-30	通信元件故障	通信元件故障
2021/07/01-31	录波器故障	录波器故障
2021/08/01-31	断路器双重失灵	断路器双重失灵
2021/09/01-30	通信元件故障	通信元件故障
2021/10/01-31	断路器双重失灵	断路器双重失灵
2021/11/01-30	通信元件故障	通信元件故障
2021/12/01-31	录波器故障	录波器故障

分析表 2 可知,应用本文方法对该母线保护装置实施母线保护装置故障三维分级检测所获得的结果,与真实情况完全一致,证明本文方法可准确地完成母线保护装置三维分级检测工作,为电力系统的安全稳定运行提供可靠保障。

图 5 是应用本文方法进行模糊知识库设计,获得的模糊知识库故障现象表显示界面。

母线保护装置故障模糊知识库

模糊知识库查询

模糊知识库打印与下载

帮助与提醒

返回主界面

故障现象表

开始页数

结束页数

搜索

Fault ID	Fault Name	MidFault	BlgSye	CF	Weight	UseYN
F001	接线故障	true	SYS006	0.88	0.79	NULL
F002	差动元件故障	true	SYS006	0.72	0.51	NULL
F003	录波器故障	true	SYS003	0.58	0.79	NULL

图 5 模糊知识库故障现象表显示界面图

从图 5 可以看出,应用本文方法可以构建母线保护装置故障模糊知识库,为母线保护装置故障三维分级检测工作提供可靠依据。

3 结 论

应用本文方法可以实现母线保护装置故障三维分级检测,并且故障检测效果较好,其在母线保护装置故障检测方面的优势主要表现为:

(1)应用本文方法对母线保护装置实施故障三维分级检测所获结果与母线保护装置实际故障状况完全一致,并可以三维可视化的方式呈现检测结果,在故障检测准确性方面具有显著优势,可为实际工作提供有效保障。

(2)应用本文方法可以有效完成母线保护装置故障模糊知识库构建工作,为母线保护装置故障三维分级检测工作提供技术支撑。

本文方法在母线保护装置故障三维分级检测工作中虽有上述优势,但是本文方法是基于母线保护装置发生单一故障条件下研究的,在实际工作中,母线保护装置极有可能同时发生多种故障。因此,本文将以此为切入点,在下一阶段对母线保护装置故障三维分级检测方法进行更深一步研究。

参考文献

[1] 徐成斌,陆兆沿,刘宏君.快速隔离母联死区故障的母线保护[J].电网与清洁能源,2020,36(10):40—47.

[2] 王风光,杜兴伟,吕航,等.就地化母线保护在电力系统中的应用[J].电力系统保护与控制,2019,47(7):155—161.

[3] 戎子睿,金能,林湘宁,等.基于 Hausdorff 距离的自适应母线保护新原理[J].电网技术,2021,45(1):312—321.

[4] 齐郑,刁春燕,李鸿毅,等.基于快速短接故障相母线熄弧装置的故障区段定位方法[J].电力系统自动化,2020,44(23):157—164.

[5] 吴迪,汤小兵,李鹏,等.基于深度神经网络的变电站继电保护装置状态监测技术[J].电力系统保护与控制,2020,48(5):81—85.

[6] 戴志辉,刘媛,邱小强,等.基于变权重模糊综合评判法的保护装置状态评价[J].电测与仪表,2021,58(4):150—157.

[7] 李铁成,刘清泉,任江波,等.基于动态优化马尔可夫链的线路继电保护装置状态预测方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(13):97—106.

[8] 张武洋,王同,曹子恒,等.站用直流电源系统中新型主动式保护装置的研究[J].电气传动,2021,51(20):29—35.

[9] 彭华亮,沈暑龙,李军,等.基于故障树的故障诊断专家系统设计[J].控制工程,2019,26(3):584—588.

[10] 耿苏杰,王秀利.基于模糊贝叶斯网络的电力设备故障诊断和状态评估[J].计算机集成制造系统,2021,27(1):63—71.

[11] 张磊,汤小伟,李红兵,等.一种考虑成像特性的摄像机线性标定方法[J].中南大学学报(自然科学版),2020,51(7):1832—1841.

[12] 任勇峰,王国忠,储成群,等.基于 CMOS 传感器的高性能图像采集系统设计[J].仪表技术与传感器,2019,432(1):64—67.

[13] 李荣乐,罗长洲,李龙华,等.基于 FPGA 的交换机芯片配置器设计[J].计算机仿真,2020,37(2):41—46.

[14] 史宏艳,罗敏霞.基于区间值相似度的模糊推理算法[J].电子学报,2022,50(11):2738—2745.

[15] 郑宏亮,侯雪辉,宋笑迎,等.基于犹豫模糊可信度的知识推理[J].计算机科学,2019,46(1):131—137.