

电网故障智能诊断技术研究综述

刘仲民¹, 呼彦喆², 张 鑫³

(1. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

(2. 兰州理工大学电气工程与信息工程学院, 甘肃 兰州 730050)

(3. 国网甘肃省电力公司检修公司, 甘肃 兰州 730050)

[摘要] 电网故障诊断技术在国内外应用已十分广泛, 随着人工智能的快速发展, 基于智能方法的电网故障诊断得到前所未有的发展. 本文对结合专家系统、贝叶斯网络、Petri 网、多源信息融合技术、人工神经网络的电网故障诊断原理及框架进行了综述. 根据实际工程的应用情况, 对各种智能诊断方法的长处和不足以及各自未来的发展方向进行了详细阐释. 最后以智能电网建设为背景, 大数据为依托, 利用智能电网故障诊断技术解决所面临的实际问题, 并对电网故障诊断技术的未来发展趋势进行了展望.

[关键词] 电网, 故障诊断, 智能技术, 发展趋势

[中图分类号] TP277 [文献标志码] A [文章编号] 1001-4616(2019)03-0138-07

Research Review on Intelligent Fault Diagnosis Technology of Power Grid

Liu Zhongmin¹, Hu Yanzhe², Zhang Xin³

(1. Lanzhou University of Technology, Lanzhou University of Technology, Gansu 730050, China)

(2. Electrical Engineering & Information Engineering School, Gansu 730050, China)

(3. State Grid GANSU Maintenance Company, Gansu 730050, China)

Abstract: At present, the fault diagnosis technology of power grid has been widely used at home and abroad. At the same time, power grid fault diagnosis based on intelligent methods has realized unprecedented development with the rapid development of artificial intelligence. In this paper, it makes the summary of the principle and framework of power grid fault diagnosis through the combination of expert system, Bayesian network, Petri network, multi-source information integration technology and artificial neural network. According to the application of practical engineering, it makes the explanation of the advantages and disadvantages of various intelligent diagnosis methods and their future development directions in detail. Finally, it uses the smart grid fault diagnosis technology to solve practical problems under the background of smart grid construction and on the basis of large data, which also looks forward to the prospect of the future development trend of power grid fault diagnosis technology.

Key words: power grid, fault diagnosis, intelligent technology, the development trend

电网故障诊断是电网自我智能修复的重大突破. 电网故障诊断通过检测与对比故障前后的各种电气量信息、保护动作和断路器动作的开关量变化情况来发现故障元件同时找出故障原因. 故障原因的准确识别可大幅度提高故障处置的效率, 同时还可以预防故障扩大. 当电网发生故障时, 海量信息(涵盖了正确报警信息、错误报警信息、重复报警信息和不相关信息)被同时送入调度中心. 调度人员面对大量信息的同时涌入, 难以对故障信息做出及时、准确的判断与处理.

由于地理、历史、经济等因素造成了我国供电源与用电负荷严重失衡, 需要跨省级长距离输送电能, 很大程度上增大电网出现故障的风险. 随着国民经济的不断发展, 社会对电力企业供电的可靠性与稳定性提出了更高的要求. 2013 年《中国电力大数据发展白皮书》的发布不仅预示着中国电网进入了智能化时代, 还体现了大数据背景下电网故障诊断所面临巨大的挑战. 因此, 现有电网故障模型在全面总结和合理完善的基础上, 对电网故障诊断深入研究具有重要的现实意义.

经过几十年的发展,电网故障诊断技术相比于初始阶段已经有了长足的进步与发展. 且随着人工智能技术的快速发展,越来越多的电网故障诊断方法中融入了人工智能技术,电网故障诊断技术获得了质的飞跃. 本文在此基础上对电网故障诊断领域近年来取得的研究成果进行了总结,主要有:粗糙集理论、专家系统、贝叶斯网络、多源信息融合、优化解析模型、Petri 网、人工神经网络、数值计算分析和解析模型等方法. 并结合当前电网故障诊断领域所面临的实际情况,总结出不同诊断方法的优缺点及适用范围. 同时提出了各方法目前亟待解决的关键问题以及电网故障诊断未来的发展走向.

1 故障数据来源分析

当电网发生故障时,首先是故障元件的电气量发生突变,随后保护监测系统检测到故障后开始保护动作,并将保护信息送至断路器,驱使断路器跳闸,从而将故障元件从电网系统中隔离出来. 电网故障过程如图 1 所示.

由于电网故障时会产生大量的信息,需要不同的监测系统对这些信息进行采集、存储和访问. 现阶段电网故障信息主要来源于两种采集系统,一种是数据采集与监控系统 (supervisory control and data acquisition, SCADA),另一种是广域测量系统 (wide area mea-surement system, WAMS). 早在 20 世纪 60 年代,SCADA 系统开始应用于电力系统^[1],是早期电网故障诊断技术的数据基础. 20 世纪 80 年代,伴随着计算机技术的快速进步,以第二代 SCADA 为数据信息基础的专家系统正式应用于电网故障诊断^[2]. SCADA 系统的广泛应用极大推动了电网故障诊断技术的进步,但由于 SCADA 系统无法对暂态信息进行采集,只能利用收集到的遥信数据对故障进行分析,从而诊断准确率就会受到遥信数据的影响.

广域测量系统(WAMS)是电力系统一种新兴的测量与监控系统,相比于其他监测系统,其突出优点是:可以在时间-空间-幅值三维坐标下同时观察电力系统机电动态过程的全貌. 同时 WAMS 系统具有良好的数据传输性,可为电网故障诊断提供更为准确的实时断面数据^[3]. 由于当时 WAMS 系统技术不太成熟且一些关键部件造价昂贵,导致其实用化进展较为缓慢. 但近年来,我国各地区电网开始大面积装备同步相量测量装置 (phasor measurement unit, PMU),以 WAMS 系统为基础的电网故障诊断实用化研究在我国具有很大的发展空间.

2 多种电网故障诊断智能方法研究现状

电网故障诊断通过各级调度中心对电气量和开关量的异常信息进行分析,发现故障元件,找到故障原因. 表 1 对现阶段国内外应用广泛的几种智能诊断方法的优劣势进行了分析.

表 1 智能诊断方法的优劣势对比

Table 1 Comparison of advantages and disadvantages of intelligent diagnostic methods

智能方法	优势	劣势
专家系统	具有较强的解释能力和推理能力;在电网中应用比较成熟	专家规则库的更新与维护十分困难;处理复杂故障效率低
贝叶斯网络	故障诊断模型直观、清晰;可在故障信息不确定、不完整的情况下做出决策	对先验概率有较高的需求度;面对复杂故障系统建模困难
Petri 网	诊断结果图形化表示;推理过程简单且速度快;诊断过程逻辑性强	通用性差;面对故障信息不确定的故障时诊断准确率低
多源信息融合技术	相较于单一信源的诊断方法具有更高的诊断准确率和更好的决策方案	缺乏对故障信息的充分利用;数据融合技术有待提高
神经网络	推理速度快、学习能力强、鲁棒性好、容错率高	对训练样本的要求高;解释能力差;通用性差;容错率低

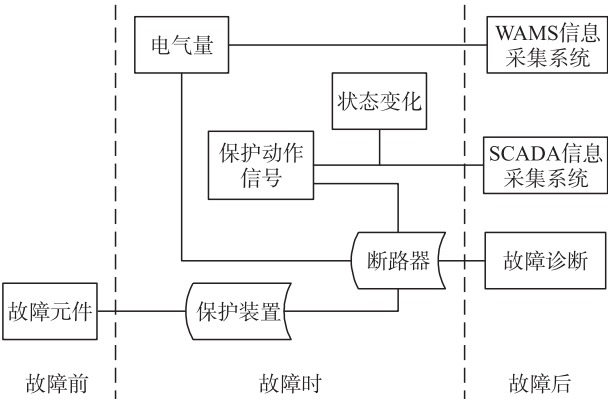


图 1 电网故障过程

Fig. 1 Fault process of power grid

2.1 基于专家系统的故障诊断方法

专家系统是将保护、断路器和设备之间建立的映射关系同已有的专家知识相结合,对电网进行故障诊断的一种方法,由 Feighbaum 教授于 1968 年提出. 专家系统以高度专业化、求解专门问题的能力为特点,通过数据库、知识库、推理机的有序连接,再与相关专业领域知识相交融,具备了可以解决专业领域问题的能力. 70 年代初,专家系统被引入电网故障诊断领域. 经过几十年的发展与创新,时至今日专家系统仍是电网故障诊断中应用最广泛、效果最显著的智能故障诊断系统.

当电网发生故障时,将收到的报警信息送入基于专家知识建立的规则库进行匹配. 通过规则匹配诊断出故障元件,根据故障元件确定故障区域,再利用推理过程和诊断结论对故障原因进行解释.

专家系统在电网故障诊断中应用得比较成熟. 面对确定信息的故障具有极强的推理和诊断能力,同时对故障结果有着十分完善的解释. 但随着电网规模的不断扩大,其拓扑结构变得越来越复杂,专家系统的规则库难以进行及时的更新与维护;面对告警信息误报、告警信息漏报、告警信息重复报警等情况,专家系统很难在这种情况下做出准确的诊断;由于单一知识专家系统对诊断系统只能诊断其知识对应的故障,面对多重复杂故障无法诊断,不具备独立诊断的特性. 文献[4]将专家系统与模糊集理论相互融合,在对保护装置误操作或不操作的分析和对电气信息量和保护信息量进行模糊推理,建立全新的模糊专家系统故障诊断系统. 新系统在很大程度上提升了专家系统的容错性. 文献[5]基于有限状态机对专家系统进行合理建模,结合改进的离散事件仿真(discrete event simulation, DES)提出全新模型离散事件系统(discrete event systems, ODES),搭建简单推理模型,增强面对复杂连锁故障时的诊断推理能力. 文献[6]以智能体模型为基础,结合了协同式专家系统结合了协同式专家系统,构建了基于智能体框架模型的协同专家系统. 该系统很好地消除了单一专家系统所存在的局限性,同时又增强了系统的鲁棒性和对复杂故障的诊断能力,提高了诊断精度. 文献[7]基于智能互不融合理念,将粗糙集、神经网络和专家系统进行结合. 首先利用混合聚类的方法对故障初始数据进行聚类处理,再使用粗糙集理论对聚类后的数据进行约简,减少里面的冗余信息,最后利用径向基神经网络(radial basis function, RBF)网络对已经处理过的数据进行识别并对输出结果进行修正. 多种方法的融合在很大程度上提高了专家系统诊断的准确性,也在一定程度上提高了其容错率. 文献[8]通过改进频繁模式(frequent pattern)算法,分析故障序列内在信息,提出了基于特征挖掘的关联规则挖掘方法. 同时利用监控所得信息,来完善专家系统规则库. 该方法不仅提高了诊断的速度与准确率,同时还改善了专家系统规则库维护和更新难的现状.

伴随其他智能诊断方法的不断出现,国内外专家学者将专家系统与其他智能技术相结合,对专家系统进行了一定程度的优化与改进,取得了不错的成效. 但在工程实际应用中,基于专家系统的智能诊断方法依然无法满足拓扑结构愈加复杂、范围逐渐扩大的电网系统故障诊断的需求. 如何建立一个具有自主学习能力且能自更新、自维护的专家系统是未来研究的重点.

2.2 基于贝叶斯网络的故障诊断方法

贝叶斯网亦称“信念网”,它借助有向无环图来刻画属性之间的依赖关系,并使用条件概率来描述属性的联合概率分布.

虽然基于贝叶斯网络的故障诊断模型可在报警信息不全的情况下针对电网故障提出较为全面的诊断决策,在很大程度上缓解了由于告警信息不全导致系统难以对故障进行准确分析的困境. 但是贝叶斯网络在实际工程应用中却存在诸多缺陷. 由于贝叶斯网络只有在获得较为准确的先验概率时才可以保证故障诊断的准确率,对复杂多重电网故障时一般难以实现;面对拓扑结构复杂且规模较大的电网系统时由于贝叶斯理论过于复杂和严密,很难对此情况进行建模. 文献[9]把粗糙集理论与贝叶斯网络相结合,利用粗糙集约简冗余信息,在保证分类不变的情况下尽可能简化故障信息,再利用贝叶斯网络进行诊断推理并得出诊断结果. 提高了在关键信息缺失的情况下故障诊断的准确率. 文献[10]将分层递归思想与贝叶斯网故障诊断系统相互融合,对规模大且拓扑结构复杂的电网系统进行划分,同时利用粗糙理论对电网故障数据进行分层挖掘,最终通过贝叶斯网络故障诊断模型做出解释. 文献[11]搭建了基于时序贝叶斯知识库,建立了故障元件、保护动作和断路器之间的时序因果表达,并且通过贝叶斯反向、正向推理,可诊断出故障元件所在的位置,有效减小了非故障元件的故障概率,避免将正常元件误认为故障. 文献[12]通过对元件的故障类型进行分类,并对各类故障模式构建贝叶斯网络故障诊断模型,大幅度简化了构建模型的难

度.对保护和断路器信息进行可信度分析中加入贝叶斯推断理论,提高了贝叶斯网络故障诊断模型的容错率.文献[13]对基于推理链的电网故障诊断进行优化,将动态因果推理链理论引入贝叶斯网故障诊断体系,通过时序检查来矫正误报、漏报以及重复报警信息,提高了故障诊断的准确率.

在实际的电网故障诊断中,以贝叶斯网络为基础的故障诊断系统仍存在以下问题有待改进:1)如何在既保证建模难度不是很大又能保证设备之间关联信息不缺失情况下对拓扑结构复杂且规模较大的电网进行建模;2)如何能在实际工程中较为容易地求得先验概率,这对保障故障诊断准确率具有重大意义;3)如何将其他智能诊断方法与贝叶斯网络诊断模型相结合,增强贝叶斯网络的鲁棒性.

2.3 基于 Petri 网的故障诊断方法

Petri 网是 20 世纪 60 年代由德国教授 Carl Adam Petri 提出.1992 年印度学者 Jenkensel 和 Khincha 将 Petri 网应用于电网故障领域. Petri 网利用图形来进行直观表述,可以清晰地表示系统内部的功能关系.在电网故障诊断领域中, Petri 网作为一种加权有向网络,不仅可以借助数学计算推理出保护、断路器和各元件之间的互联关系,还能以图形的形式对电网拓扑结构等进行直观的解释.

基于 Petri 网的电网故障诊断技术具有很快的诊断速度,而且可以通过图形直观表达故障诊断的结果.不过当电网拓扑结构复杂且运算位维数较高时, Petri 网模型很难快速且准确地得出诊断结果;同时当电网结构发生变化时,由于 Petri 网的泛化能力较差,很难应对变化后的电网结构,进而很难对电网的故障做出及时的反应和准确的诊断;且在关键故障信息缺失的情况下, Petri 网模型的容错率也会大大降低.伴随智能诊断技术的不断进步,近年来国内外学者提出了多种改进型 Petri 网模型.通过对原有 Petri 网的不足进行了改进,期望获得更好的诊断效果.文献[14]把模糊集理论引入 Petri 网故障诊断模型中,通过对母线和其余支线分别建立分层模糊 Petri 网,实现了对被检测故障模型进行结构简化.同时根据时序约束交叉检查法,面对出现电网多重故障或关键信息缺失的情况下依然可以依靠时序分析来发现故障元件.文献[15]通过对 Petri 网的不断改进,将神经网络和模糊技术引入 Petri 网,创造性地提出了神经 Petri 网(neural petri network, NPN)和模糊 Petri 网(fuzzy neural petri network, FNPN).相比传统 Petri 网诊断方法,新方法可利用更少的参数来进行诊断,降低了整体计算的复杂度,同时大幅提高了诊断速度.文献[16]通过对元件、保护和断路等不同设备赋予不同的颜色,通过颜色来表示各器件之间的关系,简化了故障模型的复杂程度,降低了运算的维数,使建模变得更加容易.文献[17]通过电网内各元件建立各保护子网和诊断子网的方法,对故障模型进行分层建模,使得 Petri 网能够适应电网拓扑结构的变化,提高了 Petri 网的泛化性和通用性.

改进的 Petri 网相较于传统 Petri 网来说解决了传统 Petri 网存在的缺陷,能更好地应用于工程实际中.通过引入电气量信息和时序信息,提高了 Petri 网的诊断准确率.但仍存在以下不足.(1)如何预防因电网系统拓扑结构不断变大而导致的“信息爆炸”现象;(2)如何在关键故障信息缺失或保护、断路器误报信息的条件下依然能保持诊断的准确性;(3)如何能够简化建模环节,更加准确高效地对故障系统进行建模.怎样能将研究成果更好地应用到实际中,是重点需要探索的方向.

2.4 基于多源信息融合技术的故障诊断方法

多源信息融合技术实际上是一种多元信息综合技术,通过对来自不同数据源的信息进行分析处理后再进行智能化的合成,得出最终的诊断结果,从而产生了比单一信源更精确、更完全的估计与决策,从而提高了诊断结果的准确率^[18-19].

在电网故障诊断领域,多源信息融合技术通过引入各种电气量信息,通过多种智能方法的处理后,再与处理过的开关量信息进行融合,得出最终的诊断结果.基于多源信息融合的电网故障方法由于具有多种故障信息来源,可以避免因故障信息来源单一且故障信息不确定等而导致的诊断错误.文献[20]将网络拓扑、SCADA 开关量、故障录波数据等信息引入电网故障诊断技术,通过计算横向纵向的灰色关联度,并将其进行加权融合,可得出故障线路的灰色关联度,从而发现故障区域,找到故障元件.文献[21]将专家系统、神经网络和模糊系统 3 种诊断方法有机地结合在一起,建立了一个混合智能诊断系统.该系统不仅能同时检测一定区域内的多个故障,同时还可以根据数据对一些电气设备的故障进行早期预估.文献[22]将溯因推理网络(abductive reasoning network, ARN)模型预测方法和数据清洗技术引入电网故障诊断.通过模型预测方法保证电气量信息的准确;利用数据清洗方法筛选和验证故障信息;最后使用溯因推

理网络对故障信息进行诊断. 改善了传统诊断方法仅依靠开关量信息进行诊断的情况, 提高了电网遇到连锁复杂故障时的诊断准确性. 多 Agent 系统技术可以结合智能系统自主完成故障诊断, 文献[23]将多 Agent 系统技术与传统的故障诊断技术相结合, 通过对相关区域的电流进行差流计算, 实现故障区域的精准定位. 同时结合 SCADA 系统、有机耦合保信系统、故障录波系统等, 对故障元件进行快速辨识. 文献[24]将模糊集理论与遗传算法相结合, 建立一种基于 T-S 模糊模型, 用遗传算法改进搜索过程, 提出了一种新型电网故障诊断技术. 通过综合考虑各种自然灾害对区域电网的危害, 筛选出容易发生故障的元件和线路. 在此基础上, 利用粗糙集对决策表进行约简, 最终根据约简后的决策表提取故障规则. 不仅提高了诊断速度, 而且很大程度上解决了在信息不完备情况下故障诊断准确率低的问题.

相较于基于单一数据源的传统诊断方法, 基于多元信息融合技术的故障诊断方法将来自不同数据源的开关量信息与电气量信息进行综合利用, 在很大程度上提高了诊断的准确率. 由于智能电网的建设规模不断扩大, 电网的调度模式将发生重大变化, 传统的分散调度转为集中调度. 新一代的调度控制系统可以获得更加全面的故障信息. 如何利用好新一代的调度控制系统, 做到对多源信息进行充分利用. 不仅进行诊断层面的融合, 还要做到数据处理层面的融合, 提高诊断结果的解释能力, 是未来研究的重点.

2.5 基于人工神经网络的故障诊断方法

人工神经网络是模拟生物神经系统对信息进行并行处理的信息综合处理系统, 以报警信息作为输入, 诊断结果作为输出, 可以在信息不确定的情况下实现准确的电网故障诊断^[25]. 目前, 以 BP 神经网络和 RBF 神经网络为代表的前馈神经网络, 较为广泛地应用于电网故障诊断中.

神经网络作为近年来的新兴方法, 具有推理能力强、鲁棒性好、容错率高、学习能力强等诸多优点^[26]. 但在实际工程应用中, 基于神经网络的故障诊断方法存在诸多问题, 例如: (1) 由于神经网络对故障诊断结果的解释性较差, 一般无法满足实际工程的需求. (2) 神经网络需要大量的样本数据对构建的模型进行训练, 实际工程中往往难以取得全面的样本来供其进行训练. (3) 神经网络具有较差的泛化性, 每当电网结构发生改变时, 神经网络都必须更改样本重新进行学习, 极大地增加了现场维护的难度, 也严重影响了用户体验. 文献[27]以专家系统故障诊断方法为基础, 将 BPNN 模型作为基准学习模型, 采用遗传算法和最小二乘法作为优化算法, 提出了一种新的故障诊断方法. 在这个模型中, 知识函数取代了传统的成本函数, 它为每个个体和对预测结果进行了修正. 该改进方法大幅度提高了诊断的准确率. 文献[28]将 RBF 神经网络和模糊积分引入电网故障诊断技术, 建立新型基于 RBF 神经网络的电网故障诊断方法. 通过对大规模电网结构进行划分, 并针对每个局部子网络建立 RBF 神经网络诊断模块, 同时采用 3-D 矩阵自动生成模型技术, 改善了基于神经网络的故障诊断方法适用性差的问题, 使其不受电网结构变化的影响. 文献[29]针对传统诊断方法无法对不平稳、非线性的故障信号做出快速诊断和复杂连锁故障时, 诊断准确率较低等情况, 提出一种基于深度卷积网络的未知复合故障诊断模型. 首先将采集到的故障信号通过小波变换生成频谱图像, 然后将图像输入卷积神经网络. 利用卷积神经网络自适应的特征提取能力对复合故障进行特征学习, 最后通过分类器对输出特征结果进行分类, 完成故障诊断. 文献[30]将多 Agent 系统和小波 SOM 神经网络引入电网故障诊断技术. 利用多 Agent 系统判定故障方位, 通过小波 SOM 神经网络判断故障原因, 改善了基于神经网络的电网故障诊断需要大量样本进行训练学习的问题, 该系统可在较少训练样本的基础上完成准确的故障诊断. 为了降低电网故障诊断中因人为主观因素而导致的诊断误差, 文献[31]将 BP 神经网络与加权模糊 Petri 网相结合, 通过故障信息推测出可疑元件, 再通过分别对各元件进行建模的方法来完成故障诊断, 提出了一种全新的故障诊断方法. 提高了基于神经网络的故障诊断方法的适应性与通用性. 文献[32]提出了一种基于紧凑神经网络的多级逆变器故障诊断系统. 将主成分分析法引入电网故障技术, 同时利用神经网络多层感知器检测输出电压来诊断故障原因. 此网络可大幅度减少训练所需的样本, 降低训练时间, 还可以抑制噪声对诊断结果的干扰.

近年来, 神经网络具有强大的自学习能力, 良好的鲁棒性和较高的容错率等优势. 在电网分区诊断和面向元件诊断等方面的理论研究上取得了较大的进展, 但其实际应用过程依然进展缓慢. 现阶段所要面临的问题如下. (1) 如何解决在工程实际中获取神经网络的训练时所需的优质且完整的样本问题. (2) 如何提高神经网络对诊断结果的解释能力. (3) 如何设计神经网络诊断模块使其更适用于电网故障诊断系统. 这些都是我们需要重点研究的问题.

3 电网故障智能诊断技术研究展望

伴随社会经济的高速发展,对电力供应的要求也在日渐提高,传统电网已无法满足社会需求,电力系统的更新换代势在必行,智能电网应运而生. 智能电网是在传统电网的基础上,建立了高集成度、高传输度的双向通信网络. 通过引入先进的测量手段、控制技术、决策方式和高度智能化的新型设备,保证了智能电网的高效、平稳运行. 智能电网的建设不仅保证了电网系统在用电压力日渐增长的今天依然能平稳、安全、高效地供电,还可以满足 21 世纪个性化用电的新需求. 智能电网是未来电网发展的必然方向.

目前我们处在智能电网大规模发展的时代,我国的智能电网建设已经全面展开,中国的电力系统已经成为全世界规模最大、涉及产业最多的专业物联网. 该物联网覆盖了从上游电力生产到下游电力供应、销售的全部产业,构筑了中国最大的“云计算”平台. 2013 年出版的《中国电力大数据发展白皮书》首次给智能电网的建设指出了明确的发展方向. 电网故障诊断技术作为电网的重要组成部分,在新的发展形势下迎来了新的挑战和机遇. 为使电网故障诊断技术能够更好地适应与服务智能电网,以下几个方面是我们今后探索和研究的重点.

(1) 基于故障信息的深度挖掘与分析. 每当电网发生故障时,海量故障信息涌入调度中心,有关联度强的保护信息、断路器信息和各种电气量信息;还有关联强度差的天气信息、电压超限信息等. 如何快速的将关联性强的信息从大量信息中提取出来,并对这些信息进行深度挖掘,根据这些信息对故障进行准确诊断,提高诊断的快速性与准确性是未来研究的重点.

(2) 电网故障诊断系统是实现智能电网自愈的重要手段. 现阶段电网故障诊断速率一般较低,如何降低故障诊断系统的复杂度,提高故障诊断的效率,降低诊断所需时间,为电网自愈争取到长的时间,是我们未来研究的重点.

(3) 基于在线电网故障诊断的实用化研究. 虽然截止目前,国内外的众多学者在电网故障诊断技术的理论研究上取得了很大的成果,但这些成果并未应用于实际工程应用中. 如何将理论成果转化为实际应用,是一个值得我们深思的问题.

(4) 由于通信技术的不断发展,各级调度中心与基层智能变电站之间的报警信息实现了实时互通,为多级协同分布式诊断技术提供了技术支撑. 伴随智能电网调控一体化的不断深入,多级协同分布式电网故障诊断技术开始被广泛关注. 采用这一技术之后,上级诊断可在下级诊断结果的基础上再进行进一步分析,实现了电网故障分层诊断的同时,降低了上级调度中心的诊断压力. 基于多级协同的分布式电网故障诊断技术目前仍处于初步研究阶段. 如何进一步地提高诊断准确率,加强各级之间的数据交换是未来需要深入研究的方向.

4 结语

电网故障诊断技术是在电网系统发生故障后迅速诊断出故障原因,协助调度人员和维修人员尽快恢复供电的重要技术. 伴随着电网建设规模不断扩大、电网拓扑结构更加复杂、电网故障的呈现多样化,单一的诊断方法很难满足实际工程中对故障诊断的需求. 电网故障诊断技术经过几十年的高速发展,多种智能方法结合的电网故障诊断方法成为了现在的主流趋势,该领域的研究也取得了较为丰硕的成果. 本文对现阶段电网故障诊断所涉及到的多种智能方法进行了综述,希望能从大量的故障诊断技术中选取最适合于我国电网现状的诊断方法,同时找到电网故障诊断所面临的实际问题,作为下一步重点研究和探索的对象. 目前我国处在智能化电网大规模建设的关键时期,如何将多技术融合的智能诊断方法应用到工程实际中去,更好地保证电网的平稳运行,也是值得我们深思的问题.

[参考文献]

- [1] RUSSELL J C, MASIELLO R D, BOSE A. Power System Control Center Concepts [C]//Power Industry Computer Applications Conference. Minneapolis, Minnesota, USA:IEEE,2002.
- [2] FUKUI C,KAWAKAMI J. An expert system for fault section estimation using information from protective relays and circuit breakers[J]. Power delivery IEEE transactions on,1986,1(4):83-90.

- [3] DOBAKSHARI A S, RANJBAR A M. A circuit approach to fault diagnosis in power systems by wide area measurement system[J]. European transactions on electrical power, 2013, 23(8): 1272-1288.
- [4] LEE H J, PARK D Y, AHN B S, et al. A fuzzy expert system for the integrated fault diagnosis[J]. IEEE transactions on power delivery, 2000, 15(2): 833-838.
- [5] RESHMILA S, DEVANATHAN R. Di-agnosis of power system failures using observer based discrete event system[C]//IEEE International Conference on Control, Measurement and Instrumentation. Kolkata, India, 2016.
- [6] 赵伟, 白晓民, 丁剑, 等. 基于协同式专家系统及多智能体技术的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006(20): 1-8.
- [7] 邓武, 杨鑫华, 赵慧敏, 等. 粗糙集、神经网络和专家系统模型用于电力系统故障诊断[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1624-1628.
- [8] 李再华, 白晓民, 周子冠, 等. 基于特征挖掘的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 16-22.
- [9] 凌子俊, 胡超, 唐军胜. 基于贝叶斯网络和粗糙集的电网故障诊断方法[J]. 科技视界, 2014(31): 79, 109.
- [10] 宋功益, 王晓茹, 周曙. 基于贝叶斯网的电网多区域复杂故障诊断研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(7): 20-25, 31.
- [11] 孙明蔚, 童晓阳, 刘新宇, 等. 运用时序贝叶斯知识库的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2014, 38(3): 715-722.
- [12] 罗孝辉, 童晓阳. 计及可信度的变结构贝叶斯网络电网故障诊断[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2658-2664.
- [13] 韩迎春, 童晓阳. 基于动态推理链的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1315-1324.
- [14] 童晓阳, 谢红涛, 孙明蔚. 计及时序信息检查的分层模糊 Petri 网电网故障诊断模型[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(6): 63-68.
- [15] BINH P T T, TUYEN N D. Fault diagnosis of power system using neural Petri net and fuzzy neural Petri net[C]//Power India Conference. IEEE, New Delhi, India, 2006.
- [16] 谢敏, 吴亚雄, 黄庶, 等. 基于有色自控 Petri 网的电网故障区域识别[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 56-64.
- [17] 谢红涛, 童晓阳. 基于分层模糊 Petri 网的电网故障综合诊断方法[J]. 电网技术, 2012, 36(1): 246-252.
- [18] 刘同明, 夏祖勋, 解洪成. 信息融合技术及其应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998: 12-13.
- [19] BEDWORTH M, O' BRIEN J. The Omnibus model: a new model of data fusion? [J]. Aerospace & electronic systems magazine IEEE, 2009, 15(4): 30-36.
- [20] 韩迎春, 童晓阳. 利用时空电气量基于灰色关联度的电网故障诊断[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 581-588.
- [21] JOTA P R S, ISLAM S M, WU T, et al. A class of hybrid intelligent system for fault diagnosis in electric power systems[J]. Neurocomputing, 1998, 23(1-3): 207-224.
- [22] 刘晓琴, 王大志, 张翠玲, 等. 基于模型预测和溯因推理网络的电网故障诊断方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2016, 37(4): 472-476, 480.
- [23] 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.
- [24] 陈哲, 江晓燕, 岑炳成, 等. 基于多种算法融合的区域电网在线故障诊断[J/OL]. 电力系统及其自动化学报: 1-7 [2019-06-12].
- [25] NOVELO A F, CUCARELLA E Q, MORENO E G, et al. Fault diagnosis of electric transmission lines using modular neural networks[J]. IEEE Latin America transactions, 2016, 14(8): 3663-3668.
- [26] THUKARAM D, KHINCHA H P, VIJAYNARA S H P. Artificial neural network and support vector Machine approach for locating faults in radial distribution systems[J]. IEEE transactions on power delivery, 2005, 20(2): 710-721.
- [27] WU Q L, ZHANG H J. A novel expertise-guided machine learning model for internal fault state diagnosis of power transformers[J].
- [28] XIONG G J, SHI D Y, CHEN J F, et al. Divisional fault diagnosis of large-scale power systems based on radial basis function neural network and fuzzy integral[J]. Electric power systems research, 2013, 105: 9-19.
- [29] 张应军, 江永全, 杨燕, 等. 基于深度卷积神经网络的未知复合故障诊断[J]. 中国科技论文, 2019(2): 204-209.
- [30] 孙波, 黄建波, 陆洁, 等. 基于小波 SOM 神经网络和多 Agent 系统的微电网故障诊断方法[J]. 舰船电子工程, 2018, 38(8): 151-155, 186.
- [31] 杨彦杰, 毛亚峰, 唐圣学, 等. 基于 RTDS 和神经网络的光储微电网线路故障诊断[J]. 可再生能源, 2018, 36(7): 1010-1016.
- [32] KHOMFOI S, TOLBERT L M. Fault diagnosis system for a multilevel inverter using a neural network[C]//Conference of IEEE Industrial Electronics Society. Paris, France, 2006.

[责任编辑: 陆炳新]