

电力系统故障诊断研究现状与展望

王家林, 夏立, 吴正国, 杨宣访

(海军工程大学电气与信息工程学院, 湖北 武汉 430033)

摘要: 概述了专家系统、人工神经网络、优化技术、Petri 网络、粗糙集理论、模糊集理论、贝叶斯网络、多 Agent 技术和基于故障录波器信息等方法在电力系统故障诊断中的应用, 并在此基础上对文献中提出的相应的电网故障诊断方法进行述评, 分析它们在电网故障诊断中应用的特点以及存在的主要问题, 以解决实际工程问题为目标, 指出了该领域所面临的问题, 并对其发展进行了展望, 以促进该研究领域的进一步发展。

关键词: 电力系统; 故障诊断; 人工智能; 优化技术; 多 Agent 技术

State of arts of fault diagnosis of power systems

WANG Jia-lin, XIA Li, WU Zheng-guo, YANG Xuan-fang, LI Zhe

(School of Electronic and Information Engineering, Naval Univ of Engineering, Wuhan 430033, China)

Abstract: The current methods for fault diagnosis of power systems including expert system, artificial neural network, optimization method, Petri network, rough set theory, fuzzy set theory Bayesian network, multi-agent technology, and methods based on fault recorder information are surveyed. The characteristics and applicability of those methods are briefly analyzed and also the existing drawbacks and their improvements are given. Finally, several key technical issues and the main development trends of the topic are pointed out to solve the practical problems and motivate further development.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50677069).

Key words: power systems; fault diagnosis; artificial intelligence; optimization techniques; multi-Agent system

中图分类号: TM711; TP18 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0210-07

0 引言

电力系统发展使得电网的规模越来越大, 结构越来越复杂, 不同区域之间的互联也越来越紧密, 能量管理系统和数据采集监控系统在电网调度中心得到了广泛的应用, 这就使得系统中所发生的故障对系统本身的影响也随之扩大, 因此电力系统故障诊断研究具有重要的现实意义。电力系统故障诊断是通过利用有关电力系统及其保护装置的广泛知识和继电保护等信息来识别故障的元件位置(区域)、类型和误动作等参数, 其中故障元件的识别是关键问题。在电网发生故障后, 将会有大量的报警信息通过各单元的远程终端装置(RTU)传送到系统的能量管理中心, 为故障诊断提供数据源。而在复杂故障或自动装置动作不正常时(保护、断路器的误

动拒动)以及信道原因导致出现信号出错或收不到信号的情况下, 实际应用中很难给出准确的故障诊断结果。为了适应各种简单和复杂事故情况下故障的快速、准确识别, 需要电力系统故障诊断系统进行决策参考。目前, 国内外提出了许多电力系统故障诊断的技术和方法^[1-7], 主要有专家系统、人工神经网络、优化技术、Petri 网络、粗糙集理论、模糊集理论、贝叶斯网络、多 Agent 技术和基于故障录波器信息等方法。下面分别介绍这几种应用在电力系统故障诊断的研究发展状况。

1 电力系统故障诊断国内外研究发展状况

1.1 基于专家系统原理的电力系统故障诊断

专家系统(expert system)是发展最早, 也是比较成熟的一种人工智能技术。70 年代初期专家系统就引入到电力系统故障诊断研究领域, 其所具有的特点与电力系统故障诊断问题有许多切合点, 因此基于专家系统的故障诊断研究时间最长、研究最多。

基金项目: 国家自然科学基金(50677069); 国防科技重点实验室基金(9140C8402040802)

专家系统在电力系统故障诊断^[8-9]中的典型应用是基于产生式规则的系统, 即把保护、断路器的动作逻辑以及运行人员的诊断经验用规则表示出来, 形成故障诊断专家系统的知识库, 进而根据报警信息对知识库进行推理, 获得故障诊断的结论, 具有直观性、实时性和有效性; 能够在一定程度上解决不确定性问题; 能够给出符合人类语言习惯的结论并具有相应的解释能力等优点。

几十年的研究发展历程, 基于专家系统的电力系统故障诊断理论在知识获取和构造方面有了很多的改进, 其发展的趋势是力图使知识获取、知识表达工作简化, 进而使故障诊断的推理效率得到提高。但专家系统实现故障诊断的基本原理没变, 因此, 在实际应用中的某些固有缺陷仍是不能忽视的: (1) 知识获取的瓶颈问题。知识的获取需靠人工移植, 所以获取完备的知识库是形成故障诊断专家系统的瓶颈。(2) 系统维护难。专家系统的知识库要经常根据实际情况进行相应的修改, 所以专家系统的维护工作量很大, 文献[10]采用将大规模电力系统进行网络分割的方法可以在电网结构发生变化时, 只需对相应的知识库进行少量改进, 系统就可以适应网络的变化, 便于故障诊断系统的维护和升级, 为解决专家系统维护难的问题提供了很好的思路。(3) 容错能力较差。对于知识库没有涵盖的新故障情况, 专家系统会出现误诊。将专家系统的多种优化智能模型结合起来发挥各自的优点; 与模糊理论结合起来, 对知识进行模糊推理, 能改善专家系统的容错能力, 这也是专家系统近几年发展的主要趋势。

1.2 基于人工神经网络的电力系统故障诊断

与专家系统相比, 基于人工神经网络 (artificial neural network, ANN) 的故障诊断方法具有鲁棒性好、容错能力强和学习能力强等特点。电力系统网络中不同的故障组合 (模式) 会产生不同的故障信息组合 (模式), 可以将故障诊断问题视为模式识别问题, 采用人工神经网络进行处理^[11]。为此需要建立比较完全的训练样本, 用预选事故集作为输入, 故障信息集作为监督输出, 对神经网络进行训练。目前应用于电力系统故障诊断的 ANN^[12-15]有: 基于 BP (back propagation) 算法的前向神经网络和基于径向基函数的神经网络等。

基于 ANN 的诊断方法的主要特点是避免了专家系统故障诊断所面临的知识库构造等难题, 不需要推理机的构造。由于用于 ANN 训练的完备样本集获取困难, 目前该方法只比较适合中小型电力系统的故障诊断。ANN 方法在故障诊断应用中存在的问题主要是: (1) 其性能取决于样本是否完备,

而大型的电力系统的完备样本集获取非常困难; (2) 与符号数据库交互的功能较弱; (3) 不擅长处理启发性的知识; (4) 不知如何确保 ANN 训练时收敛的快速性和避免陷入局部最小; (5) 缺乏解释自身行为和输出结果的能力。

目前, 针对 ANN 收敛性和易陷入局部最小的问题, 将遗传优化算法, 群智能算法与 ANN 结合起来, 对 ANN 进行网络训练, 改善 ANN 的性能。使 ANN 更能适应电力系统在线故障诊断是一个有待进一步研究的问题。1995 年美国的 KaK 教授首次提出了量子神经计算的概念^[16], 1997 年 N.B.Karayiannis 等人借用量子理论中量子态叠加的思想, 提出基于多层激励函数的量子神经网络模型^[17], 文献[18]将其应用到电力系统故障诊断中, 取得了很好的效果。Tammy 等人提出的多宇宙的量子神经网络模型^[19]是多个相似网络组件的叠加, 这种模型的特点是训练时间短和可消除灾变性失忆现象, 如何将实值描述转换为量子态描述是将量子神经网络应用到电力系统故障诊断中需要进一步研究的问题。因此, 一方面可将 ANN 与其他一些人工智能技术相结合, 发挥各种方法的优点; 另一方面打破当前的神经网络模型和结构, 提出新的神经元计算模型和结构, 以促进 ANN 能更好地在电力系统故障诊断中得到应用和发展。

1.3 基于优化技术的电力系统故障诊断

随着计算机技术和智能计算技术 (特别是仿生智能计算) 的发展, 国内外学者提出了多种优化算法, 采用现有的各种优化算法进行电网的故障诊断是一种新的思路。采用优化算法需要根据电网故障的特点设定假想事故集的目标函数 (或适应度函数), 各种优化算法根据适应度值对假想事故集进行更新, 直至搜索到适应度最大的假想事故集, 以作为最终故障诊断的结果。其实质是将故障诊断问题转化为无约束的 0-1 整数规划问题进行寻优处理。目前所用的优化算法有: 遗传算法、模拟退火算法、Tabu 搜索算法、模拟分子进化算法、贪婪算法等, 其中遗传算法最为普遍。将遗传算法应用于电网故障诊断, 需建立根据报警信息, 估计故障点的模型, 为了让诊断结果解释报警信息, 给出故障诊断问题的适应度函数, 从而将故障诊断问题转化为 0-1 整数规划问题。文献[20-22]在考虑到电力系统的保护信息很不完整的实际情况下, 采用了同时利用保护和断路器信息的故障诊断的解析模型 (无约束 0-1 整数规划模型), 并采用遗传算法或对遗传算法进行改进或与其他优化算法相结合求解, 使算法能更好地寻到最优解, 提高了诊断速度, 能够更好地好处

理分析复杂的故障情况。

优化型诊断模型理论上是严密的,而且能够在诊断所依据信息不完整的情况下给出全局最优或局部最优的多个可能的诊断结果,具有很好的应用前景。优化型电网故障诊断模型实现的关键在于:如何根据保护配置原则和保护与断路器之间的逻辑关系,自动地形成保护和断路器的期望状态,进而自动形成目标函数。至于,构建好优化型诊断模型后,采用何种方法来寻优是次要的。另外,此模型在一些方面尚需进一步探讨:(1)如何建立合理的电网故障诊断数学模型,在形成目标函数的过程中,需要考虑多级后备保护时比较困难;(2)由于优化方法在寻优过程中存在随机因素,有可能会失去某些最优解;(3)由于在诊断过程中必须进行迭代,从而导致速度较慢,提高诊断速度也是一个重要的研究方向。

1.4 基于 Petri 网络的电力系统故障诊断

Petri 网 (Petri net, PN) 的概念最初是由联邦德国的 Carl Adam Petri 于 1962 年在他的博士论文《用自动机通信》中提出的^[23]。它以网络理论为基础描述系统中离散事件之间的逻辑关系,以代数矩阵运算演绎系统中同时发生或次序发生的各种动态活动。电力系统故障属于一个离散事件的动态系统,由系统中各级电压、各类保护动作反映故障,并把切除故障的过程看作一系列事件活动的组成,而事件序列与相应实体联系在一起。动态事件主要包括实体活动和信息流活动。鉴于电力系统故障动态过程描述的可行性,可确定用 Petri 网去构造电力系统诊断模型。

文献[24]报道,印度学者 Jenkins L 和 Khincha H P 在 1992 年最早将 PN 原理应用于电力系统建模的研究。之后 PN 在电力系统的多个研究领域得到了应用,显示出了广阔的应用前景。文献[25]最早报道了 PN 在电力系统故障诊断中的应用,该方法仅需进行简单的矩阵计算,不需要在庞大的解空间中寻找最优解,诊断速度快,并给出了误动作和不确定性信息的模板。但该文是针对一个元件只配置一组保护的情况设计的,没有考虑对同一元件配备多套保护的情况。此后,对基于 Petri 网络电力系统故障诊断的改进方法^[26-30]有:采用冗余编码、引入概率理论等来改进生成矩阵;将 Petri 网络理论与模糊理论、专家系统等相结合,发挥各自优点进行故障诊断。对大规模电网基于 Petri 网模型建模时,因设备增加和网络扩大会出现状态的组合爆炸,且基本的 Petri 网不能描述时间特征要求高的行为特征,因此在复杂系统建模时,需要采用高级的 Petri 网,

如谓词/变迁网,有色时间网等。

基于 Petri 网络的电力系统故障诊断方法的主要特点是它可以对同时发生、次序发生或循环发生的故障演化过程进行定性和定量的分析,比较适合于变电站的故障诊断。该方法存在的不足之处主要有:(1)它要求具有足够多的经验知识,才能建立起完整的 Petri 网,其节点过多,容易产生状态空间爆炸;(2)容错能力较差,不易识别错误的报警信息。目前,国内外关于 Petri 网技术在电网故障诊断方面的应用还处于理论研究阶段,随着电网结构日益庞大和复杂,建立的 Petri 网规模越来越大,如何根据故障诊断的自身特点建立简化的 Petri 网模型,是 Petri 网技术实现故障诊断实用化的前提。

1.5 基于粗糙集理论的电力系统故障诊断

由波兰数学家 Z. Pawlak 于 1982 年提出的粗糙集方法,为处理不精确/不确定与不完全数据并从数据中挖掘出需要的知识,提供了一种有效的途径。粗糙集理论的主要思想是:在保持分类能力不变的前提下,通过知识约简,导出问题的决策或分类规则。它无需提供问题所需处理的数据集合之外的任何先验信息,能有效地分析和处理不精确、不一致、不完整等各种不完备数据,从中发现隐含知识,揭示潜在规律。鉴于粗糙集理论的优越性,已经有不少研究者把它引入到电力系统故障诊断系统中^[31]。针对配电网故障诊断的故障模式存在不确定性信息的情况,文献[32-33]运用粗糙集理论及其改进算法研究了不完备警报信息模式下的电网故障诊断方法,实验结果表现出良好的容错性能,但其对不确定性问题用隶属度函数来描述时,存在如何建立有效隶属函数的问题。

基于粗糙集理论的诊断方法的主要特点是:用粗糙集理论进行电网的故障诊断,关键是对知识表的约简。它能较强地处理信息不完整和信息冗余的情形。该方法需要进一步改进之处有:(1)粗糙集方法的诊断规则的获取取决于条件属性集下各种故障情况训练样本集;(2)当丢失或出错的警报信息不是关键信号时,不会影响诊断结果;然而,当丢失或出错的警报信息是关键信号时,诊断结果将受到影响;(3)当考虑发生多重故障时,粗糙集方法将出现决策表十分庞大、甚至出现“组合爆炸”问题。

1.6 基于模糊理论的电力系统故障诊断

模糊理论 (fuzzy theory) 是将经典集合理论模糊化,并引入语言变量和近似推理的模糊逻辑,具有完整的推理体系的智能技术。随着模糊理论的发展及完善,模糊理论的一些优点逐步被重视,如模

糊理论可适应不确定性问题;其模糊知识库使用语言变量来表述专家的经验,更接近人的表达习惯等。模糊理论在电力系统故障诊断的应用分两类情况:一类认为诊断所依据的信息正确,但故障与对应的动作保护装置和断路器状态之间存在不确定的关联关系,以及用模糊隶属度对这种关联关系进行定量描述^[34];另一类则认为诊断所依据的报警信息的可信度不为1,而根据系统网络拓扑与故障所发生的动作保护、断路器状态赋予报警信息的可信度,再由专家系统或ANN给出故障诊断结果的模糊输出^[35]。当在专家系统中融入模糊理论后,由精确推理变为近似推理,在相当程度上增强了专家系统的容错性^[36]。模糊理论除了与专家系统相结合构成诊断系统外,也可以与其他各种人工智能技术(如人工神经网络、遗传算法、Petri网络)结合在一起,分析不确定因素对智能诊断系统的影响,提高诊断的准确率。然而,在模糊集理论中,由于隶属度的获取,复杂系统的模糊模型的建立、辨识,语言规则的获取、遗忘、修改等理论和方法还不够完善,使该理论的应用受到了限制。

1.7 基于贝叶斯网络的电力系统故障诊断

贝叶斯网络是基于图论和严格的概率理论的一种不确定性知识表达和推理模型。它将因果知识和先验概率信息有机结合,使用概率理论来处理不同知识成分之间因条件相关而产生的不确定性,运用贝叶斯定理计算后验概率,可计算在当前故障征兆下的各元件的故障概率,实现故障诊断。贝叶斯网由节点和有向弧组成,网络中的定性信息可通过贝叶斯网的拓扑结构表达,定量信息则通过节点的条件概率密度表达。基于贝叶斯网络及其改进方法的电力系统故障诊断方法^[37-38]能针对电力系统故障诊断中存在的信息不完备和不确定性问题,建立完备和不完备信息下的贝叶斯网络模型进行故障诊断,但该方法需要先验概率信息,给出的亦是故障概率,而且贝叶斯网络的训练较复杂,从理论上讲,它是一个NP-complete问题,也就是说,对于现在的计算机是不可计算的。但是,对于某些应用,这个训练过程可以简化,并在计算上实现。

1.8 基于多Agent技术的电力系统故障诊断

多Agent系统(multi-agent system, MAS)被看作是分布式人工智能的试验平台,当一个问题在物理上或逻辑上能形成分解的多个问题求解实体时,每个子问题求解实体仅仅拥有问题求解所需的有限数据、信息和资源,不同的子问题求解实体之间必须相互交互才能最终求解问题。MAS中Agent的自治性以及Agent之间的合作、协同等特征为电力系统

故障诊断提供了一种自然的建模方式。1995年,在文献[39]中Lekkas等人提出了将多Agent技术应用于动态电力系统环境中的故障定位。文献[40]提出了一个分层故障诊断多智能体系统(MAS)模型,这些方法通过将复杂问题分解,应用多Agent协调求解,以实现动态电力系统中的自动故障定位,并满足一定的精度和计算速度要求,但是未给出如何选择最优的协同方式以满足需求。

MAS技术目前尚处于发展的初级阶段,其在不同领域的研究与应用还有待于进一步完善。在多Agent故障诊断系统的应用研究中,还应该着重解决以下几个方面的问题:(1)建立和完善多Agent的故障诊断系统的分布式系统实现所面临的软件和硬件问题;(2)MADS的通信机制。研究复杂实时动态条件下的通信机制,包括通信方式、语言及通信协议等;(3)MADS的协同求解、推理机制问题(4)MADS的并行分布计算模型问题;(5)MADS的协同求解结论融合问题;(6)MADS的多Agent的推理及学习算法模型问题。

1.9 基于故障录波器信息的电力系统故障诊断

在电力系统发生复杂故障或开关、保护存在较多误动、拒动以及因信道干扰而发生信息丢失等诸多不确定因素的影响下,目前基于开关和保护信息的诊断方法已经不能取得满意的结果,而随着继电保护及故障录波信息网的建立,丰富的录波信息为进一步诊断提供了基础。文献[41-42]提出基于故障录波数据的,综合利用了故障录波、SOE以及保护事件等故障信息的方法和虚拟保护的诊断思想,有效地弥补了利用开关、保护信息诊断的局限性。文献[43]开发了一种基于故障录波信息的调度端电网故障诊断系统软件,兼有故障录波信息管理和故障录波信息分析的功能,在实用化方面做出了有益的探索。但是保护装置实现电网的保护功能,有一套严格的精细的分析处理算法和逻辑,其本身的动作行为是经过严格测试的,所以在诊断过程中,不考虑保护监控等装置的动作行为,直接以整个变电站或某个局域网为对象,按照保护的思路采用交流量来实现故障定位目前不太可行,效果也不佳。这种计算分析型的诊断方法应充分发挥可靠性可以略低于保护装置、非实时、原始信息全等特点,在保护行为和故障前发生事件的相关性方面和充分利用其他测量信息方面开展拓展研究。

2 电力系统故障诊断所面临的问题与研究发展方向

鉴于上述的诊断理论研究现状、诊断系统实现

条件以及实际需求等各方面因素,为了更好地研究和应用电力系统故障诊断问题,今后应重点开展以下几个方面的工作^[1-7]:

(1) 信息不完整情况下的电力系统故障诊断方法研究。现有方法的前提条件在很多实际电力系统中是无法满足的,应用这些方法时必须给出一些简化假设,例如假设状态信息不可获取的继电保护均处于未动作状态,这样做与实际情况可能是不相符的,有可能引起错误的诊断结果。到目前为止,对继电保护信息不完整情况下的电力系统故障诊断问题还没有提出系统的解决方法,这是电力系统故障诊断领域中有待解决的主要难题之一。

(2) 采用单一智能方法进行诊断存在着很大的局限性,将多种智能方法融合实行故障诊断,优势互补,将成为故障诊断的必由之路。如采用多种智能体理论来构建电网诊断模型;在诊断知识提取(故障信息预处理)方面的引入当前研究较热的数据挖掘理论、粗糙集理论等,以适应海量故障信息、信息冗余,以及部分信息丢失或被噪音污染等特点。

(3) 随着电网技术的发展,电网结构越来越复杂、庞大,融合多种智能方法对大规模连锁故障进行追踪和预警,实现从静态故障诊断到动态诊断是故障诊断的发展趋势。同时随着 Internet 的发展,基于网络的故障诊断将成为现实,通过对设备状态的远程监测和网络化的跟踪,以实现了对设备故障的早期诊断和及时维修。

(4) 电网故障诊断理论的实用化方面的研究,鉴于诊断理论大多基于智能化方法,所以实用化进程的推进不单对诊断领域,对整个智能领域都具有重要意义。开展电力系统故障诊断的实用化研究,结合电力系统的实际情况,充分重视故障综合信息的收集与整理,包括用于故障诊断的数据仓库的构建、故障综合信息的预处理和诊断知识的提取等,构建、实现区域电网的故障诊断系统,从实际应用中提炼出关键问题,采用智能化诊断方法实现诊断范围内故障后的分析处理,为运行、检修人员查找事故原因提供辅助分析和决策手段。

3 结语

电力系统故障诊断是关系到电力系统安全稳定运行的重要问题,从20世纪80年代起已经进行了大量的研究工作,提出了多种故障诊断技术和方法,但实际系统中该问题并未很好地解决。随着电力系统规模日趋庞大,结构更加复杂,对电力系统故障诊断提出了更高的要求。本文介绍了专家系统、人工神经网络、模糊理论、遗传算法及Petri网络等方

法与技术,在电网故障诊断中的应用。上述各种方法与技术,是从不同的途径去解决故障诊断问题的,但同时也存在着相应的缺陷。如何将各种诊断算法进行有机结合、取长补短,使其能更好满足现场实际需求,是今后故障诊断算法需要继续的研究方向。同时这些理论本身还不是很成熟,需要进一步完善,而且某些应用还只是处于探讨和实验阶段,距离工程实际还有差距,因此无论是在理论研究还是工程应用方面都还有很多工作要做。

参考文献

- [1] 毛鹏,许扬,蒋平. 输电网故障诊断研究综述及发展[J]. 电力系统保护与控制, 2005, 33 (22): 79-86.
MAO Peng, XU Yang, JIANG Ping. Survey and development on fault diagnosis in power systems [J]. Power System Protection and Control, 2005, 33 (22): 79-86.
- [2] 郭创新,朱传柏,曹一家,等. 电力系统故障诊断的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (1): 34-37.
GUO Chuang-xin, ZHU Chuan-bai, CAO Yi-jia, et al. State of arts of fault diagnosis of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (1): 34-37.
- [3] 毕天姝,倪以信,杨奇逊. 人工智能技术在输电网络故障诊断中的应用述评[J]. 电力系统自动化, 2000, 24 (25): 11-16.
BI Tian-shu, NI Yi-xin, YANG Qi-xun. An evaluation of artificial intelligent technologies for fault diagnosis in power network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (25): 11-16.
- [4] 陈玉林,陈允平,孙金莉等. 电网故障诊断方法综述[J]. 中国电力, 2006, 39 (5): 27-31.
CHEN Yu-lin, CHEN Yun-ping, SUN Jin-li, et al. A survey of power system fault diagnoses[J]. Electric Power, 2006, 39 (5): 27-31.
- [5] 曾素琼. 人工智能及其在输配电网络故障诊断的应用[J]. 海南大学学报自然科学版, 2006, 24 (2): 188-193.
ZENG Su-qiong. Artificial Intelligent Technologies and the Application in Fault Diagnosis in Power Network[J]. Natural Science Journal of Hainan University, 2006, 24 (2): 188-193.
- [6] 廖志伟,孙雅明,叶青华. 人工智能技术在电力系统故障诊断中应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(6): 71-78.
LIAO Zhi-wei, Sun Ya-ming, Ye Qinghua. Artificial intelligent technologies for fault diagnosis in power system [J]. Proceedings of Electric Power System and Automation, 2003, 15 (6): 71-78.
- [7] Ban Zhen-xiang, Wen Fu-shuan, Zhang Qi. Artificial

- intelligence applications in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24 (2): 2-10.
- [8] Young Moon Park, Wang Won Kim, Jin Man Sohn, A logic based expert system (LBES) for fault diagnosis of power system[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (1): 363-369.
- [9] Angeli C. Online expert systems for fault diagnosis in technical processes[J]. Expert Systems, 2008 (3): 115-132.
- [10] BI Tian-shu, JIAO Lian-wei, YAN Zheng, et al. Graph partitioning method for distributed fault section estimation system in power networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 16: 16-21.
- [11] TAN J C, CROSSLY P A, GOODY J, et al. Fault section identification on a transmission network using action factors and expert system technology[C]. //Proceedings of 13th Power Systems Computation Conference (PSCC' 99). Trondheim (Norway): 1999. 820-826.
- [12] CHAN E. Application of neural network computing in intelligent alarm processing[C].//Power Industry Compute Application Conference. Seattle(USA): 1989: 246-251.
- [13] 毕天姝, 倪以信, 吴复立, 等. 基于新型神经网络的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程报, 2002, 22(2): 73-78.
BI Tian-shu, NI Yi-xin, WU Fu-li. A novel neural network approach for fault section estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (2): 73-78.
- [14] Cardoso Jr, Rolimjg. Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19 (3): 1034-1041.
- [15] 廖志伟, 叶青华, 王钢, 等. 基于GRNN的多故障自适应电力系统故障诊断[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2005, 33 (9): 6-9.
LIAO Zhi-wei, YE Qing-hua, WANG Gang, et al. Adaptive multi-fault diagnosis of power system based on GRNN[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science, 2005, 33 (9): 6-9.
- [16] KaK S. Quantum neural computing[J]. Advances In Imaging and Electron Physics. 1995, 94: 259-313.
- [17] Gopathy P, Nicolaos B, Karayiannis B. Quantum neural networks: inherently fuzzy feed forward neural networks [J]. IEEE Trans on Neural Networks, 1997, 8 (3): 679-693.
- [18] 刘超, 何正友, 杨健维. 基于量子神经网络的电网故障诊断算法[J]. 电网技术, 2008, 32 (9): 57-60.
LIU Chao, HE Zheng-you, YANG Jian-wei. A quantum neural network based fault diagnosis algorithm for Power grid[J]. Power System Technology, 2008, 32(9): 57-60.
- [19] Ajit N, Ammy M. Quantum artificial neural network architectures and components[J]. Information Science, 2000: 231-255.
- [20] 许仪勋, 陆拯, 郭志忠. 基于遗传算法的电力系统分层信息故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2000, 28 (10): 15-18.
XU Yi-xun, LU Zheng, GUO Zhi-zhong. Layered information fault diagnosis based on genetic algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2000, 28 (10): 15-18.
- [21] 许先锋, 龚乐年, 陈星莺. 基于广度优先搜索和优化算法的输电网故障诊断[J]. 电力系统及其自动化学报, 2004, 16 (5): 5-8.
XU Xian-feng, GONG Le-nian, CHEN Xing-ying. Fault diagnosis in transmissi on electricity network based on BFS and optimize algorithm[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2004, 16 (5): 5-8.
- [22] 毕天姝, 倪以信, 吴复立, 等. 基于混合神经网络和遗传算法的故障诊断系统[J]. 现代电力, 2005, 22(1): 31-36.
BI Tian-shu, NI Yi-xin, WU Fu-li, et al. Novel method for fault diagnosis in power systems with hybrid neural network and genetic algorithm[J]. Modern Electric Power, 2005, 22 (1): 31-36.
- [23] 王建元, 纪延超, 常群. Petri网络理论在电网故障诊断中的应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2002, 7(4): 77-80.
WANG Jian-yuan, JI Yan-chao, CHANG Qun. Application of petri nets theory to power systems fault diagnosis[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2002, 7 (4): 77-80.
- [24] 林振智, 文福拴, 钟志勇, 等. Petri网在电力系统中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19 (5): 14-21.
LIN Zhen-zhi, WEN Fu-shuan, ZHONG Zhi-yong, et al. Applications of petri nets in power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2007, 19 (5): 14-21.
- [25] Lo K L, Ng H S, Trecat J. Power systems fault diagnosis using petri nets[J]. IEEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 1997, 144 (3): 231-236.
- [26] SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Yong-hua. A fault diagnosis method for power system based on PETRI nets and probability information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (13): 10-14.
- [27] 栗然, 仇晓龙. 基于模糊Petri网的输电网故障诊断改进方法[J]. 中国电力, 2008, 41 (5): 50-54.
LI Ran, QIU Xiao-long. Improvement in fault diagnosis of transmission networks using fuzzy petri nets[J]. Electric Power, 2008, 41 (5): 50-54.
- [28] 任惠, 赵洪山, 米增强, 等. 基于编码PETRI网的电网故障诊断[J]. 电网技术, 2004, 28 (5): 64-68.

- REN Hui, ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, et al. Power system fault diagnosis by use of encoded PETRI net models[J]. Power System Technology, 2004, 28 (5): 64-68.
- [29] 方培培, 李永丽, 杨晓军. Petri网与专家系统结合的输电网络故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17 (2): 26-30.
- FANG Pei-pei, LI Yong-li, YANG Xiao-jun. Transmission power system fault diagnosis based on petri Nets and expert system[J]. Proceedings of the CUS-EPSA, 2005, 17 (2): 26-30.
- [30] ZHAO Hong-shan, MI Zeng-qiang, YANG Qi-xun. Substation fault diagnosis based on PETRI nets embedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (2): 32-35.
- [31] 束洪春, 孙向飞, 于继来. 粗糙集理论在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (3): 90-95.
- SHU Hong-chun, SUN Xiang-fei, YU Ji-lai. A survey on application of rough set theory in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (3): 90-95.
- [32] 张志毅, 袁荣湘, 杨同忠, 等. 基于粗糙集和小生境遗传算法的电网故障诊断规则提取[J]. 电工技术学报, 2009, 24 (1): 158-163.
- ZHANG Zhi-yi, YUAN Rong-xiang, YANG Tong-zhong, et al. Rule extraction for power system fault diagnosis based on the combination of rough sets and niche genetic algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24 (1): 158-163.
- [33] SUN Ya-ming, LIAO Zhi-wei. Assessment of data mining model based on the different combination rough set with neural network for fault section diagnosis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (6): 31-35.
- [34] Monsef H, Ranjbar A M, Jadid S. Fuzzy rule based expert system for power system fault diagnosis[J]. IEEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution, 1997, 144 (2): 186-192.
- [35] Cho H J, Park J K. An expert system for fault section diagnosis of power systems using fuzzy relations[J]. IEEE Transaction on Power Systems, 1997, 12 (1): 342-348.
- [36] 张崇刚, 郭旭辉, 黄昭婷, 等. 模糊理论在故障诊断专家系统中的应用[J]. 中国测试技术, 2008, 34 (5): 122-125.
- ZHANG Chong-gang, GUO Xu-hui, HUANG Zhao-ting, et al. Applying fuzzy theory to fault diagnosis expert systems[J]. China Measurement & Testing Technology, 2008, 34 (5): 122-125.
- [37] WU Xin, GUO Chuang-xin. Power system fault diagnosis approach based on bayesian network[J]. Proceedings of CUS-EPSA, 2005, 17 (4): 11-13.
- [38] 吴欣, 郭创新, 曹一家. 基于贝叶斯网络及信息时序属性的电力系统故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (13): 14-16.
- WU Xin, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia. A new fault diagnosis approach of power system based on bayesian network and temporal order information[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (13): 14-16.
- [39] Lekkas GP, Avouris N M, Pakonstantinou G K. Development of distributed problem solving systems for dynamic environments[J]. IEEE Trans on Systems, Man and Cybernetics, 1995, 25 (3): 400-414.
- [40] ZHU Chuan-bai, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia. Hierarchical fault diagnosis model of a large-scale Power system based on dispatch integrated information platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33 (1): 51-55.
- [41] 杜一, 张沛超, 郁惟镛, 等. 基于故障录波数据的分布式电网故障诊断系统[J]. 电力系统保护与控制, 2003, 31 (1): 26-29.
- DU Yi, ZHANG Pei-chao, YU Wei-yong. A distributed power system fault diagnosis system based on recorded fault data[J]. Power System Protection and Control, 2003, 31 (1): 26-29.
- [42] 何赞峰, 赵冬梅, 高曙, 等. 一种基于故障录波信息的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2002, 26 (5): 39-43.
- HE Zan-feng, ZHAO Dong-mei, GAO Shu, et al. A power system fault diagnosis method based on recorded fault data[J]. Power System Technology, 2002, 26 (5): 39-43.
- [43] 王颖, 王增平, 潘明九. 一种基于故障录波信息的调度端电网故障诊断系统[J]. 电力系统保护与控制, 2003, 31 (12): 37-40.
- WANG Ying, WANG Zeng-ping, PAN Ming-jiu. A fault diagnosis system based on recorded fault data in power systems[J]. Power System Protection and Control, 2003, 31 (12): 37-40.

收稿日期: 2009-09-30; 修回日期: 2010-01-14

作者简介:

王家林 (1984-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统自动化及其安全运行; E-mail: wang0600519@sina.com

夏立 (1964-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能工程技术、电力系统网络及智能化监控管理技术;

吴正国 (1943-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电能质量的分析与控制技术。