

# 输电网故障诊断方法综述与发展趋势

林 圣, 何正友, 钱清泉

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

**摘要:** 综述了近年来研究得较多的输电网故障诊断方法, 包括专家系统、人工神经网络、Petri网、贝叶斯网络、优化方法、模糊集理论、信息理论和多代理技术等。简要概括了它们的诊断原理和特点, 并评述其存在的不足和近年来的研究成果。最后, 从目前输电网故障诊断的研究现状以及面临的问题出发, 指出了该领域所需解决的关键技术问题和主要发展趋势, 以促进该研究领域的进一步发展。

**关键词:** 故障诊断; 输电网; 人工智能; 优化方法; 发展趋势

## Review and development on fault diagnosis in power grid

LIN Sheng, HE Zheng-you, QIAN Qing-quan

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

**Abstract:** The current proposed methods for fault diagnosis of power grid, including expert system, artificial neural network, Petri net, Bayesian network, optimization method, fuzzy set theory, information theory and multi-agent system, are surveyed. The diagnosis principle and characteristics of these methods for power grid fault diagnosis are briefly analyzed and the existing flaws and the research results recently are reviewed as well. Finally, several key technical issues and the main development trends of the topic are pointed out to solve the practical problems and motivate further developments.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No. 50877068) and New Century Excellent Talents of Education Ministry(No. NCET-06-0799).

**Key words:** fault diagnosis; power grid; artificial intelligence; optimization methods; development trends

中图分类号: TM711; TP18 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)04-0140-011

## 0 引言

随着社会的发展, 电能用户对电能可靠性特别是供电连续性的要求越来越高, 然而电力系统特别是输电网的故障却是不可避免的, 准确、快速的输电网故障诊断是实现事故情况下科学调度, 尽快排除故障、恢复供电, 保证电网安全、稳定、经济运行的重要手段, 因此, 输电网故障诊断研究具有重要的现实意义。近年来, 电网规模不断扩大、结构日益复杂, 当输电网发生故障时, 大量的报警信息在短时间内涌入调度中心, 尤其当发生多重故障或自动装置动作不正常时, 情况更加严重, 这远远超出了运行人员的故障处理能力, 易使调度员误判、漏判。为了适应各种简单和复杂事故情况下故障的

快速、准确的识别, 建立先进、准确、高效的自动故障诊断系统具有强烈的实际需求。另一方面, 由于调度自动化水平的不断提高、故障录波专用网络的建设以及电力专用通信网络系统的不断完善, 能够为输电网故障诊断提供越来越全面和完备的故障综合信息, 这些信息可通过各变电站的远程终端装置传送到各级电网调度中心, 使得利用采集的实时信息进行输电网故障诊断成为可能。

输电网故障诊断主要是对各级各类保护装置产生的报警信息、断路器的状态变化信息以及电压电流等电气量测量的特征进行分析, 根据保护动作的逻辑、运行人员的经验和电气量的特征量来推断可能的故障位置和故障类型<sup>[1]</sup>。本文首先综述了近年来用于输电网故障诊断的方法, 包括专家系统、人工神经网络、Petri网、贝叶斯网络、优化方法、模糊集理论、信息论和多代理技术等, 简要概括了它们应用在输电网故障诊断中的基本原理和特点, 并

**基金项目:** 国家自然科学基金(50877068); 教育部优秀新世纪人才支持计划项目(NCET-06-0799)

评述其存在的不足和近几年研究者对这些不足的改进成果。最后,总结了目前输电网诊断所面临的问题,并指出了该领域所需解决的关键技术问题和发展趋势。

## 1 国内外研究现状综述

### 1.1 基于专家系统的故障诊断方法

专家系统(expert system, ES)是发展最早,也是比较成熟的一种人工智能技术<sup>[2-4]</sup>,它利用计算机技术将相关领域的理论知识和专家的经验融合在一起,通过数据库、知识库、推理机、人机接口、解释程序和知识获取程序的有机连接,达到具备解决专业领域问题的能力。目前,专家系统已比较成熟地运用于输电网故障诊断中,常用正向推理<sup>[5-6]</sup>、反向推理和正反混合推理<sup>[7-8]</sup>三种推理机制;而模型建构上基本分为基于事例推理和基于规则推理的专家系统。

基于专家系统的输电网故障诊断方法的主要特点是可以方便地把保护和断路器的动作逻辑以及运行人员的诊断经验用直观的、模块化的规则表示;允许在知识库中增加、删除或修改一些规则,以确保诊断系统的实时性和有效性;并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。

虽然专家系统能够有效地模拟故障诊断专家完成故障诊断的过程,但是在实际应用中仍存在一定缺陷:(1)获取一个完备的知识库是形成故障诊断专家系统的瓶颈,不完备的知识可能导致专家系统推理混乱并得出错误的结论,而知识的获取及其完备性的验证是比较困难的。(2)专家系统在推理时要搜索、匹配知识库内一定的规则集才能得出结论,故当系统比较大时诊断的速度将非常慢。(3)当输电网络的结构或自动装置的配置发生变化时,专家系统的知识库要进行相应的修改,所以大型专家系统的维护难度很大。(4)专家系统不具备学习能力,一旦发生知识库没有涵盖的新故障情况,专家系统将发生诊断错误或得不到结果。(5)容错能力较差,缺乏有效的方法识别错误信息。

近年来,国内外学者就改进专家系统应用于输电网故障诊断的缺陷方面做了不少的研究。针对知识获取困难、自学能力差的缺陷,可应用基于事例和规则混合推理的故障诊断系统,该系统在使用中可不断地增加新事例以提高系统判断复杂故障的能力<sup>[9]</sup>。针对大规模输电网,专家系统诊断速度较慢的缺点,可以用Petri网与专家系统相结合的方法来克服专家系统难以用数学方法描述的缺点,利用Petri网建立数学模型以提高诊断速度<sup>[10]</sup>。运用多种

人工智能技术相结合的方法可在一定程度上克服专家系统容错性差的缺陷,如专家系统与粗糙集理论<sup>[11-12]</sup>、人工神经网络<sup>[13]</sup>、模糊理论<sup>[14-17]</sup>相结合等来提高故障诊断的容错性。

### 1.2 基于人工神经网络的故障诊断方法

基于人工神经网络(artificial neural network, ANN)的输电网故障诊断是从该领域专家所提供的大量和充分的故障实例中形成用于故障诊断神经网络模型的训练样本集,通过一定的学习、训练使神经网络获得对电网故障的诊断功能,并具有一定的联想和泛化能力。

目前,ANN在输电网络故障诊断中的应用主要在故障元件识别<sup>[18-21]</sup>和故障类型识别<sup>[22-25]</sup>两个方面。对于故障元件的识别是以输电网络中所有可能获得的保护和断路器的状态量作为输入,以所有可能的故障元件作为输出,并以0、1二进制来表明输入、输出相量激活与否;对于故障类型的识别是以线路电流、电压等电气量的特征向量作为输入,以可能的故障类型作为输出。故障诊断所利用的神经网络模型主要有基于BP(back propagation, BP)算法的前向神经网络<sup>[26-28]</sup>和基于径向基函数(radial basis function, RBF)的神经网络<sup>[29-31]</sup>等。标准的BP模型使用梯度下降算法训练,因此神经网络的结构必须是事先已知的,该学习算法收敛速度比较慢,并有可能收敛于局部最小点。径向基函数神经网络具有任意函数逼近能力,学习收敛速度比较快、但相应的应用条件也比较严格。

与专家系统相比,基于ANN的故障诊断避免了知识库构造等难题,不需要构造推理机;具有鲁棒性好、容错能力强、学习能力强和较快的推理速度等优点。但在应用中同样面临着一些问题:(1)ANN在使用前需要大量的、有代表性的样本供其训练、学习,但完备样本集的获取非常困难,并且当系统发生变化时需要增加新的样本重新学习,使得其现场维护性较差。(2)难以实现基于结构化知识的逻辑推理,缺乏解释能力,导致故障诊断结果不易被运行人员理解。(3)ANN学习完成之后具有较好的内插结果,但外推时则可能误差较大,特别是当系统非线性较强或具有病态特性时误差更为严重。(4)目前无法确保ANN训练的快速性和避免陷入局部最小。

近几年对基于ANN的输电网故障诊断的研究主要集中在神经网络的结构以及训练算法、大型输电网络的ANN故障诊断、ANN系统维护和提高诊断的解释能力等方面。文献[24]采用的GRNN(general regression neural network, GRNN)的学习速度远快

于BPNN；文献[30]指出PNN（probabilistic neural network, PNN）靠类别属性标记进行自监督分类，隐含层节点与输出节点之间的连接权无需训练（取常值1），比RBF网络更节约训练时间。对于大型输电网，文献[18-19]提出了一种基于最小度排序的图形分割方法将大电网分区，然后用RBFNN完成各子网络的故障诊断，文献[18]还采用GRNN方法，对相应的训练样本矩阵进行修改并自动重构和训练GRNN以提高诊断模型的维护性能。文献[20]提出了基于RBFNN网络与等值模糊系统相结合的故障诊断方法，推导并建立了RBFNN和模糊控制系统之间的等值关系，使得蕴含在RBFNN权重中的知识转变为等值模糊控制系统中用语言表述的规则，不仅提高ANN诊断的解释能力，还提高了ANN重新学习的效率。

### 1.3 基于Petri网的故障诊断方法

Petri网（Petri Net, PN）是由库所（Place）、变迁（Transition）、连接库所和变迁的有向弧及初始标识构成。库所节点是静态的，其作用是记录构成系统的个体及系统本身的状态；变迁节点使系统中状态改变的规则动态化。在输电网故障诊断中Petri网是一个加权有向网络，它以描述电网中断路器、保护、元件之间的逻辑关系为基础，用网络来表示各级、各类保护反应于故障<sup>[32]</sup>，它不仅可以用图形直观地表示出来，而且可以用矩阵运算来描述。

文献[33]最早报道了Petri网在电网故障诊断中的应用。以电力系统中的元件为单位，首先研究了故障清除过程的Petri网模型，进而对其求逆得到故障诊断的Petri网模型，再把它们组合起来形成整个电力网络的Petri网故障诊断系统。这种方法的难点和耗时部分均在设计阶段，实施故障诊断时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，因而诊断速度快。此外，文献[33]还分析了保护、断路器的误动作和不确定性对Petri网模型的影响，并分别给出了识别保护和断路器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，文献[34]在此基础上计入了后备保护，进一步发展了基于Petri网的故障诊断模型。

Petri网应用于故障诊断，具有结构表达图形化、推理搜索快速化以及诊断过程数学化等优点。基于Petri网的电网故障诊断模型的关键在于设计一个合理的Petri网结构及相应的推理规则，而这正是诊断问题的难点所在，而后续搜索处理过程是次要的。同时，基于Petri网的输电网故障诊断方法也存在以下一些问题：（1）针对现场普遍存在的保护、断路

器误动拒动及由于通信线路故障引起的故障信息畸变或丢失，Petri网的容错能力较差，不易识别错误的报警信息。（2）在多重故障情况下，Petri网的诊断性能不够理想。（3）Petri网诊断模型如何适应电网的拓扑变化。（4）对于大规模电网，Petri网建模时会因设备的增加和网络的扩大出现状态组合爆炸，需要采用高级的Petri网，如谓词/变迁网，有色时间网等理论。

近几年学者们对基于Petri网的故障诊断方法做了不少的研究工作。文献[35-36]将编码原理与Petri网相结合建立冗余嵌入Petri网，具有容错性高、计算简便、实时性好、诊断速度快、精度高等优点，可以有效提高输电网的故障诊断性能。文献[37-38]将Petri网跟模糊理论相结合，给出了电网故障诊断的模糊Petri网模型。文献[39]提出了一种改进的Petri网故障诊断模型，适用于多重故障和大型电网故障诊断。文献[40]提出了一种基于Petri网和概率信息的电力系统故障诊断方法，容错性好、诊断速度快、精度高。

### 1.4 基于贝叶斯网络的故障诊断方法

贝叶斯网络（Bayesian network, BN）是一种对概率关系的有向图解描述，它结合了数据信息和先验信息，能很好地解释系统的结构和行为；它使用概率理论来处理由不同知识成分之间的条件相关而产生的不确定性，适用于不确定性和不完备对象，运用贝叶斯定理计算出后验概率，可应用于有条件地依赖多种控制因素的决策<sup>[41]</sup>。

基于贝叶斯网络的输电网故障诊断的研究起步较晚<sup>[42-43]</sup>。文献[44]根据元件故障与保护动作和断路器跳闸之间的内在逻辑关系，应用Noisy-Or, Noisy-And节点模型，建立了面向元件的线路、母线、变压器通用故障诊断模型，并采用误差反向传播的梯度下降法修正网络参数，文献[45]在此基础上依据元件—保护—断路器间的关联关系，给出了元件诊断贝叶斯网络的自动生成方法，最后对各个元件的诊断网络进行推理，以获得元件的故障概率值。文献[46]建立了保护、断路器动作信息完备和不完备情况下的分布式贝叶斯网络模型，并综合设备可靠性数据、历史运行数据和试验模拟数据进行赋值建模，从而获得更为可靠的概率数据。文献[41]对此模型进行改进：对故障信息进行时序一致性和完备化的预处理后，建立了蕴涵信息时序属性的故障诊断BN模型。文献[47]将贝叶斯网络与粗糙集相结合，利用粗糙集进行属性约减，分析信息的冗余性，提取关键属性，然后利用贝叶斯网络的柔性推理得出诊断结果，不但可以提高系统在缺失关键报警信

息情况下的容错性,还可以提高故障诊断的速度和精度。

基于贝叶斯网络的故障诊断方法的主要特点是:诊断模型清晰直观,易于发现数据间的因果关系;综合了先验信息和后验信息,能有效地避免只使用先验信息带来的主观偏见和只使用后验信息带来的噪声的影响;适合不确定和不完备信息下进行诊断决策;有效地提高了诊断精度和速度。但如何实现复杂电网下的自动建模;如何加强知识的更新能力;如何实现信息融合下的故障诊断等问题都有待研究。

### 1.5 基于优化方法的故障诊断方法

基于优化方法(Optimization Method)的输电网故障诊断是根据设备、保护、断路器之间的逻辑关系,把故障诊断问题表示为0~1整数规划问题,通过优化算法寻找使构造的目标函数最小(最大)的最优解,即找出最能解释故障信息的故障设备和故障类型。

基于优化方法优化的输电网故障诊断模型的诊断速度快,可求得全局最优解,以及多个可能的解,但它的难点在于如何根据设备、保护动作、断路器之间的逻辑关系,建立合理的故障诊断数学模型。构建好数学模型后,可以有多种优化方法来寻优,如模拟分子进化算法、遗传算法<sup>[48-49]</sup>、模拟退火算法、Tabu搜索算法<sup>[50-51]</sup>、蚁群算法<sup>[52-53]</sup>、粒子群算法、贪婪算法等。另外,此模型在一些方面尚需进一步探讨:(1)诊断所依据的故障信息发生畸变,或出现复杂的故障模式时,如何保证结果的可靠;(2)如何根据被诊断对象特征,构建具有高容错性能的故障诊断适应度函数;(3)如何确定迭代操作的结束准则等问题。

数学模型的构建是优化方法的一个瓶颈,文献[54]提出的基于模糊外展推理和文献[55]提出的简洁覆盖集理论方法等能在一定程度上缓解这个问题。而近几年优化方法的研究主要集中在跟其他方法的结合:文献[56-57]利用两重GA循环搜索确定用于故障诊断的最优神经网络,第一重GA循环用于优化神经网络结构,第二重GA循环进一步优化神经网络的连接权重,优化后的混合故障诊断模型能更好地解决故障诊断问题。文献[58]先通过Petri网模型的状态转移方程获取所有的故障群及征兆群对子,进而利用GA求得具有较高适应度的候选诊断解,从而提高了系统的容错性。文献[59]首先应用停电区域快速搜索确定跟故障信息有关的局部电网,然后构造了只在停电区域中识别故障元件的0-1规划新

模型;最后用贪婪算法对该故障诊断模型进行求解。

### 1.6 基于模糊集理论的故障诊断方法

模糊集理论(fuzzy set theory, FT)将经典集合理论模糊化,采用模糊隶属度的概念来描述不精确、不确定的对象,并引入语言变量和近似推理的模糊逻辑,是具有完整的推理体系的智能技术<sup>[60]</sup>。一般的模糊系统的结构和专家系统的结构类似,由模糊知识库、模糊推理机和人机界面等几部分组成,可以说是模糊集理论与专家系统的结合,它在一定程度上解决了专家系统处理不确定信息的能力,提高了系统的容错性,而且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。

模糊集理论在输电网故障诊断中有比较广泛的应用<sup>[61-62]</sup>,主要是跟其他方法相结合,除与专家系统相结合外<sup>[14,63-64]</sup>,文献[20]提出了基于模糊集理论与RBF神经网络结合的故障诊断方法,使得蕴含在RBF神经网络权重中的知识转变为等值模糊控制系统中用语言表述的规则,使诊断知识易于理解,诊断过程透明,克服了神经网络解释能力差的缺点。文献[37]将模糊集理论跟Petri网相结合,提高了诊断精度,并克服了Petri网容错性较差的缺点。文献[55]利用模糊集理论(模糊外展推理)建立数学模型,然后利用优化方法(Tabu搜索)进行寻优,有效地提高了故障诊断的容错性。

总体来讲,模糊集理论与别的故障诊断方法相结合的形式有两种情况,一种是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性的关联关系,故用模糊隶属度对这种可能性进行描述;另一种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,再由专家系统或神经网络等给出故障诊断结果的模糊输出。但是不管是哪种结合形式,基于模糊集理论的故障诊断方法都存在与其相结合的诊断方法具有的一些固有缺陷,如与专家系统相结合时依然难以克服当系统比较大时完成诊断的速度比较慢、可维护性差、不具备学习能力等缺点。而且,运用基于模糊集理论的故障诊断方法时,建立什么样的隶属度数对不确定性问题进行描述是极其关键的问题;大规模复杂电网的模糊模型的建立以及当电网拓扑结构等发生变化时模糊模型的维护也是基于模糊集理论的故障诊断方法研究的难点。

### 1.7 基于信息论的故障诊断方法

信息论(Information Theory)是应用近代数理统计方法研究信息的传输、存储和处理的科学。随着信息科学的崛起和信息技术的不断发展,电力系

统逐步信息化<sup>[65]</sup>,可以把输电网发生故障并引起保护动作、断路器跳闸的过程,描述为故障信息运动的过程,然后用信息论的方法进行故障诊断<sup>[66]</sup>。

文献[67]在国内首次将基于信息论的方法应用到电网的故障诊断研究中。研究了电网故障中的信息运动过程,建立了故障诊断的信道模型;基于信息损失最小原理,提出了适用于大规模系统不确定性决策的故障诊断新方法,能给出各种可能发生的故障组合以及每种故障组合发生的概率。文献[68]进一步基于信息理论和信息技术,设计了面向实用化的地区电网辅助决策系统。

基于信息理论的电网故障诊断能一定程度解决电网故障过程中存在的不确定性;诊断速度快,能满足大规模电力系统在线故障诊断辅助决策实时性的要求,是一种新型的电网故障诊断方法。

### 1.8 基于多代理系统的故障诊断方法

多代理系统<sup>[69]</sup>(Multi Agent System, MAS)是计算机技术、网络技术和分布式人工智能相结合的产物,是近年来新兴的计算机软工技术之一,是设计和实现复杂软件系统和控制系统的新途径。具有个体行为独立自制、个体信息不完全、能力有限、无全局控制、数据分散化和计算异步等特点。

输电网故障诊断中的故障信息的产生、故障信息的采集、故障诊断、调度人员的行为呈分布状态,对其进行完全集中式的求解可能遇到信息不全、通信瓶颈或计算速度等问题;同时,不同的故障诊断方法都有自己的优缺点,如果能同时用几种方法进行诊断,将大大提高系统的诊断的正确率和容错性;此外,现有故障诊断系统对于电网事件的实时响应性不理想,一般需要做完一次完整的故障诊断后方能再去处理新的事件,而MAS能很好解决上述问题,因此适合输电网故障诊断<sup>[70-71]</sup>。

文献[72]提出了利用SCADA系统和数字故障记录信息的基于MAS技术的电力系统故障诊断系统结构,该体系结构包括6个核心Agent。文献[73]提出了一种基于多Agent的电力系统实时故障诊断方法和系统结构,根据电力系统实时故障诊断工作的特点和Agent的技术特征,将电网故障诊断系统划分为7个不同的核心Agent。

MAS具有容易实现模块化设计思想;能够利用并行分布式处理技术提高输电网故障诊断的实时性;能够同时利用多种方法实现并行故障诊断,从而使各种方法的优缺点形成互补,提高诊断正确率和系统的容错性;能够将大电网分区后进行分布式故障诊断,从而可以解决大电网故障诊断的难题等优点。但MSA中各Agent的知识和行为、协调与协

作是有待深入解决的核心问题。

## 2 输电网故障诊断面临的问题

由于系统规模、复杂程度和不确定性等因素的限制,输电网故障诊断难以通过建立常规的数学模型来进行研究,基于智能化理论来实现故障诊断是必然,其实用化前景也比较明朗<sup>[74]</sup>。虽然随着电网建设的发展、计算机技术和网络技术以及数学和智能科学理论的发展,不断有新的电网故障诊断方法出现,但从电网故障诊断理论与方法研究和应用的深度、广度可以清楚地看到,其研究仍停留在理论和模型的探索阶段<sup>[75]</sup>,依然面临着一些亟待解决的问题:(1)目前研究的输电网故障诊断方法在信息完全正确可信且完备的基础上可以得出正确的诊断结果,但在处理故障信息不确定和不完备的情况时容错性较差。(2)现有输电网故障诊断方法存在一些固有的缺陷,如专家系统的知识库构造、维护问题;人工神经网络的学习训练速度问题;Petri网的大型电网建模问题;优化方法中目标函数的建立问题等。(3)现有故障诊断策略大都偏重于利用单个诊断对象的局部信息,未能从电网全局的角度来实现诊断,很难提供运行、检修人员可以直接采用的辅助决策结论。(4)较多的电网故障诊断研究仅立足于解决诊断中某个点,以及在现有模型基础上引入新的智能算法,未能从诊断模型的建立上推进电网故障诊断研究的发展。

## 3 输电网故障诊断发展趋势

输电网故障诊断课题的定位是依据故障综合信息,借助于知识库,采用某种诊断机制来确定电网故障设备或原因,同时完成对保护装置、安全自动装置等监测、控制设备的动作行为的评价,其结构示意图如图1。

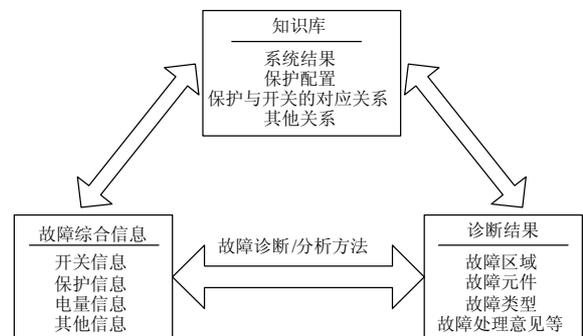


图1 输电网故障诊断结构示意图

Fig.1 Structure of fault diagnosis for power grid

根据故障诊断课题的定位我们可以重点从以下

五个方面开展研究工作:

(1) 故障综合信息的预处理与信息融合的研究。随着电网规模的不断扩大和电力系统数字化、自动化、信息化建设的推进,尤其是故障信息系统的逐步完善,使得故障信息更加完备和全面,同时也极大地增加了其数量。但是由于保护的拒动或误动、信息传输过程中的噪声影响以及信息采集时全网难以实现GPS对时,所以用于故障诊断的这些信数据将存在几个方面的问题:一、时空数据交错、信息时标不一定同步;二、信息数据包括电流电压等连续变量,也包括开关动作、保护动作等离散状态变量,连续和离散信息混合;三、信息存在不确定性、不完备性和冗余性;四、非单调性,一组故障信息可能对应多个单一故障或一个复杂故障;五、信息数据存在非平稳性及噪声,存在继电保护配合复杂和电网拓扑变化等不确定因素。因此,如何处理这些海量信息以及融合两类或更多类型的信息去进行故障诊断以提高诊断的正确性和容错性是输电网故障诊断中有待解决的主要难题之一。

(2) 基于分层分布式电网故障诊断模式的研究。电网故障诊断是以故障后所表现出的征兆信息为基础。当电网发生故障时,首先改变的是电网各节点电压、支路电流(或功率)等电气量,之后是保护装置依据电气量信息对故障判断生成保护动作信息,然后是断路器根据保护信息动作以隔离故障。换言之,故障诊断可以利用开关信息、保护信息、开关和保护所带时标的事件顺序记录信息、电气量信息等不同层次的信息来求解,即所谓的分层故障诊断。分布式故障诊断是指将故障诊断各功能模块和数据库,按实际系统的条件,分布在网络各节点。基于分层分布式的故障诊断模式可以在一定程度上解决故障信息量大、信息不确定性以及噪声对信息传递影响等问题以得到更为准确、合理的诊断结果;同时也可减小故障诊断系统的规模与复杂性以提高故障诊断的速度。

(3) 多种智能诊断技术融合使用的故障诊断方法的研究。输电网故障诊断是一个多层次、多种类问题的求解过程,从目前的研究来看,利用单一智能诊断方法进行输电网故障诊断时可以解决电网故障诊断中某个或某些方面的问题,但不可能解决电网故障诊断所面临的所有难题,甚至由于智能诊断方法本身固有的缺点还将给电网故障诊断带来新的难题。因此,在现有的研究成果上,扬长避短,采用多种智能诊断技术融合的方法来实现输电网的故障诊断是一个重要的研究方向。

(4) 电力系统健康诊断研究。文献[76]提出了电

力系统健康诊断的概念,即通过对网络与设备的状态不断进行扫描,建立其健康模型,根据其特征量的变化,诊断其“健康”程度,及时发现“病灶”并报警,必要时加以消除。由此可见,电力系统健康诊断涵盖了故障诊断、故障预测和状态监测,但在内容、时间和适用面上都有了进一步的延伸:在内容上相当于从“大病”延伸到“小病”;在时间上则从故障时延伸到平时。健康诊断可以掌握电力系统的“健康”状况,做到防患于未然,消除电力系统的潜伏性故障,防止突发性事故发生,减少事故损失。输电网是电力系统的一个重要组成部分,如若建立起了电力系统健康诊断系统,则无疑为解决输电网故障诊断问题起到一个“釜底抽薪”的作用。虽然目前这方面的研究工作较少,但它却是一个极具现实意义和挑战性的研究方向。

(5) 输电网故障诊断实用化研究。虽然输电网故障诊断研究已有较长历史,也取得了不少的研究成果,但离实际应用却还有一定的距离。截至目前,电网故障诊断的实现还未以高级应用系统产品的形式出现,诸多诊断方法中只有基于专家系统和优化方法的方法是应用较多和实用化最好的两种算法,但其为数不多的应用实例也是以科研项目的方式投入现场<sup>[77-78]</sup>。因此,随着电网建设、计算机技术、网络技术和智能算法的不断发展,电力工作者应对电网故障诊断的研究逐步推向实用化,将理论研究转化为实际产品以带来更大的经济效益与社会效应。

## 4 结语

输电网故障诊断对事故后快速恢复供电具有重要意义,是保证电网安全、稳定、经济运行的重要手段,国内外对输电网故障诊断方法的研究已有将近30年的历史,取得了一系列的理论成果,但是同时也存在着一些未解决的问题。本文介绍了近年来备受研究者关注的专家系统、人工神经网络、Petri网、贝叶斯网络、优化方法、模糊集理论、信息理论和多代理技术等输电故障诊断方法,并综述了这些方法的优缺点及近年来的研究成果,继而概括了目前输电故障诊断的现状和面临的一些亟待解决的问题,进一步从输电故障诊断课题的定位出发指出该领域所需解决的关键技术问题和主要发展趋势,以促进该研究领域的进一步发展。

## 参考文献

- [1] 毕天姝,倪以信,杨奇逊.人工智能技术在输电网故障诊断中的应用述评[J].电力系统自动化,2000,24

- (2) : 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 (2) : 11-16.
- [2] Park Y M, Kim G W, Sohn I M. A Logic Based Expert System for Fault Diagnosis of Power System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12 (1) : 363-369.
- [3] Styvaktakis E, Bollen M H J, Gu I Y H. Expert System for Classification and Analysis of Power System Events[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2) : 423-428.
- [4] ZHAO Wei, BAI Xiao-min, WANG Wen-ping, et al. A Novel Alarm Processing and Fault Diagnosis Expert System Based on BNF Rules[A]. in: Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exhibition[C]. Asia and Pacific: 2005. 1-6.
- [5] SU Yu, ZHAO Hai, SU Wei-ji, et al. Fuzzy Reasoning Based Fault Diagnosis Expert System[A]. in: Proceedings of International Conference on Networking, Sensing and Control[C]. 2004. 613-617.
- [6] 赵爽, 任建文, 周明. 分层式电网故障诊断系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (19): 65-68.  
 ZHAO Shuang, REN Jian-wen, ZHOU Ming. Design and Realization of A Delaminated Fault Diagnosis System for Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (19) : 65-68.
- [7] XIE Shao-feng, LI Qun-zhan. Application of Expert System Based on Mixing Reasoning in Traction Substation Fault Diagnosis[A]. in: Proceedings of the 2nd International Workshop on Autonomous Decentralized System[C]. 2002. 229-232.
- [8] 张学军, 刘小冰, 阎彩萍, 等. 基于正反向推理的电力系统故障诊断[J]. 电力系统自动化, 1998, 22 (5): 30-32.  
 ZHANG Xue-jun, LIU Xiao-bing, YAN Cai-ping, et al. Power Systems Fault Diagnosis Based on the Forward and Backward Reasoning[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22 (5) : 30-32.
- [9] 杜一, 张沛超, 郁惟镛. 基于事例和规则混合推理的变电站故障诊断系统[J]. 电网技术, 2004, 28 (1): 34-38.  
 DU Yi, ZHANG Pei-chao, YU Wei-yong. A Substation Fault Diagnosis System Based on Case-based Reasoning and Rule-Based Reasoning[J]. Power System Technology, 2004, 28 (1) : 34-38.
- [10] 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 CSU-EPSA, 2005, 17 (2) : 26-30.
- [11] Sun Q Y, Zhang H G. Power Distribution Diagnosis with Uncertainty Information Based on Improved Rough Sets[A]. in: Proceedings of Power Systems Conference and Exposition, IEEE / PES[C]. 2006. 1234-1239.
- [12] SU Hong-sheng, ZHAO Feng. A Novel Substation Fault Diagnosis Approach Based on RS and ANN and ES[A]. in: 2006 International Conference on Communications, Circuits and Systems Proceedings[C]. 2006. 2124-2127.
- [13] El-Fergany A A, Yousef M T, El-Alaily A A. Fault Diagnosis in Power Systems-Substation Level-through Hybrid Artificial Neural Networks and Expert System[A]. in: Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE / PES[C]. 2001. 207-211.
- [14] Lee Heung-Jae, Park Deung-Yong, Ahn Bok-Shin, et al. A Fuzzy Expert System for the Integrated Fault Diagnosis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (2) : 833-838.
- [15] Chen Wen-hui, Liu Chih-wen, Tsai Men-shen. Online Fault Diagnosis of Distribution Substation Using Hybrid Cause-effect Network and Fuzzy Rule-based Method[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15 (2) : 710-717.
- [16] Tan J C, Crossley P A, McLaren P G. Fuzzy Expert System for On-line Fault Diagnosis on a Transmission Network[A]. in: Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting[C]. 2001. 775-780.
- [17] 周明, 任建文, 李庚银, 等. 基于模糊推理的分布式电力系统故障诊断专家系统[J]. 电力系统自动化, 2001, 25 (24): 33-36.  
 ZHOU Ming, REN Jian-wen, LI Geng-yin, et al. Distributed Power System Fault Diagnosis Expert System Based on Fuzzy Inference[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25 (24) : 33-36.
- [18] 毕天姝, 严正, 文福拴, 等. 基于径向基函数神经网络的在线分布式故障诊断系统[J]. 电网技术, 2001, 25 (11) : 27-34.  
 BI Tian-shu, YAN Zheng, WEN Fu-shuan, et al. On-lined Distributed Fault Section Estimation System with Radial Basis Function Neural Network[J]. Power System Technology, 2001, 25 (11) : 27-34.
- [19] 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]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (2) : 73-79.  
 BI Tian-shu, NI Yi-xin, WU Fu-li, et al. A Novel Neural Network Approach for Fault Section Estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22 (2) : 73-79.
- [20] 毕天姝, 倪以信, 吴复立, 等. 基于径向基函数神经

- 网络和模糊控制系统的电网故障诊断新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (14): 12-18.
- BI Tian-shu, NI Yi-xin, WU Fu-li, et al. Hybrid Fault Section Estimation System with Radial Basis Function Neural Network and Fuzzy System[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (14): 12-18.
- [21] 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): 6-10.
- 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 Edition, 2005, 33 (9): 6-10.
- [22] Safty S M E, Ashour H A, Dessouki H E, et al. On-line Fault Detection of Transmission Line Using Artificial Neural Network[A]. in: Proceedings of International Conference on Power System Technology[C]. 2004. 1629-1632.
- [23] Silva K M, Souza B A, Brito N S D, et al. Fault Detection and Classification in Transmission Lines Based on Wavelet Transform and ANN[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21 (4): 2058-2063.
- [24] 杨光亮, 乐全明, 郁惟镛, 等. 基于小波神经网络和故障录波数据的电网故障类型识别[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26 (10): 99-103.
- YANG Guang-liang, YUE Quan-ming, YU Wei-yong, et al. A Fault Classification Method Based on Wavelet Neural Network and Fault Record Data[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26 (10): 99-103.
- [25] Hagh M T, Razi K, Taghizadeh H. Fault Classification and Location of Power Transmission Lines Using Artificial Neural Network[A]. in: Proceedings of 2007 International Power Engineering Conference[C]. 2007. 1109-1104.
- [26] Bretas A S, Hadjsaid N. Fault Diagnosis in Deregulated Distribution Systems Using an Artificial Neural Network[A]. in: Proceedings of Power Engineering Society Winter Meeting[C]. 2001. 821-823.
- [27] Lazim F B, Hamzah N, Arsad P M. Application of ANN to Power System Fault Analysis[A]. in: Proceedings of Student Conference on Research and Development[C]. 2002. 269-273.
- [28] Xu L, Chow Mo-Yuen. A Classification Approach for Power Distribution Systems Fault Cause Identification[J]. IEEE Trans on Power systems, 2006, 21 (1): 53-60.
- [29] Narendra K G, Sood V K, Khorasani K, et al. Application of a Radial Basis Function (RBF) Neural Network for Fault Diagnosis in a HVDC System[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1998, 13 (1): 177-183.
- [30] LIN Whei-min, YANG Chinder, LIN Jia-hong, et al. A fault Classification Method by RBF Neural Network with OLS Learning Procedure[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2001, 16 (4): 473-477.
- [31] JIANG Hui-lan, GUAN Ying, LI Dong-wei, et al. Self-adaptive Clustering Algorithm Based RBF Neural Network and Its Application in the Fault Diagnosis of Power Systems[A]. in: Proceedings of Transmission and Distribution Conference and Exhibition, IEEE / PES[C]. 2005. 1-6.
- [32] El-Fergany A A, Yousef M T, El-Alaily A A. Fault Diagnosis of Power Systems Using Binary Information of Breakers and Relays Through DPNs[A]. in: Proceedings of International Conference on Power System Tech[C]. 2002. 1122-1126.
- [33] Lo K L, Ng H S, Trecat J. Power Systems Fault Diagnosis Using Petri Nets[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1997, 144(3): 231-236.
- [34] Lo K L, Ng H S, Grant D M, et al. Extended Petri Net Models for Fault Diagnosis for Substation Automation[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm, and Distrib, 1999, 146 (3): 229-234.
- [35] REN Hui, MI Zeng-qiang, DIAO Jin-feng, et al. A Novel Power System FDI Scheme Based on Petri Nets and Coding Theory[A]. in: Proceedings of 2004 International Conference on Power System Technology[C]. 2004. 108-113.
- [36] REN Hui, MI Zeng-qiang. Power System Fault Diagnosis Modeling Techniques Based on Encoded Petri Nets[A]. in: Proceedings of Power Engineering Society General Meeting, IEEE [C]. 2006. 1-6.
- [37] SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Yong-hua. Fault Diagnosis of Electric Power Systems Based on Fuzzy Petri Nets[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2004, 19 (4): 2053-2059.
- [38] QIU Xiao-long, LI Ran. Fault Diagnosis of Transmission Network Using Fuzzy Petri Nets[A]. in: Proceedings of Power Tech, IEEE[C]. 2007. 1802-1806.
- [39] 毕天姝, 杨春发, 黄少锋, 等. 基于改进Petri网模型的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2005, 29 (21): 52-56.
- BI Tian-shu, YANG Chun-fa, HUANG Shao-feng, et al. Improved Petri Net Models Based Fault Diagnosis Approach for Power Networks[J]. Power System Technology, 2005, 29 (21): 52-56.
- [40] 孙静, 秦世引, 宋永华. 一种基于Petri网和概率信息的电力系统故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (13): 10-15.
- SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Shao-hua. A Fault Diagnosis Method for Power System Based on Petri Nets

- and Probability Information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (13): 10-15.
- [41] 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): 14-18.  
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): 14-18.
- [42] Chien Chenfu, Chen Shilin, Lin Yihshin. Using Bayesian Network for Fault Location on Distribution Feeder[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(13): 785-793.
- [43] WANG Yan, GENG Lan-qin. Bayesian Network Based Fault Section Estimation in Power Systems[A]. in: Proceedings of TENCON IEEE[C]. 2006. 1-4.
- [44] ZHU Yong-li, HUO Li-min, LIU Jin-ling. Bayesian Networks Based Approach for Power Systems Fault Diagnosis[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21 (2): 634-639.
- [45] 朱永利, 王艳, 耿兰芹, 等. 基于贝叶斯网络的电网故障诊断[J]. 电力自动化设备, 2007, 27 (7): 33-36.  
ZHU Yong-li, WANG Yan, GENG Lan-qin, et al. Power System Fault Diagnosis Based on Bayesian Network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27 (7): 33-36.
- [46] 吴欣, 郭创新. 基于贝叶斯网络的电力系统故障诊断方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17 (4): 11-15.  
WU Xin, GUO Chuang-xin. Power System Fault Diagnosis Approach Based on Bayesian Network [J]. Proceedings of CSU-EPSA, 2005, 17 (4): 11-15.
- [47] 张耀天, 何正友, 赵静, 等. 基于粗糙集理论和朴素贝叶斯网络的电网故障诊断方法[J]. 电网技术, 2007, 31 (1): 37-43.  
ZHANG Yao-tian, HE Zheng-you, ZHAO Jing, et al. A Power Network Fault Diagnosis Method Based on Rough Set Theory and Naïve Bayesian Networks[J]. Power System Technology, 2007, 31 (1): 37-43.
- [48] WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. Fault Section Estimation in Power Systems Using a Genetic Algorithm[J]. Journal of Electric Power Systems Research, 1995, 34 (3): 165-172.
- [49] Lai L L, Sichanie A G, Gwyn B J. Comparison Between Evolutionary Programming and a Genetic Algorithm for Fault-Section Estimation[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1998, 145 (5): 616-620.
- [50] Wen F S, Chang C S. Possibilistic-diagnosis Theory for Fault Section Estimation and State Identification of Unobserved Protective Relays Using Tabu Search Method[J]. IEE Proceedings on Gener, Transm and Distrib, 1998, 145 (6): 722-730.
- [51] Wen F S, Chang C S. A New Approach to Time Constrained Fault Diagnosis Using the Tabu Search Method[J]. Engineering Intelligent Systems, 2002, 10 (1): 19-25.
- [52] Chang C S, Tian L, Wen F S. A New Approach to Fault Section Estimation in Power Systems Using Ant System[J]. Journal of Electric Power System Research, 1999, 41: 63-70.
- [53] ZHANG Zhi-sheng, SUN Ya-ming. Assessment on Fault Tolerance Performance Using Neural Network Model Based on Ant Colony Optimization Algorithm for Fault Diagnosis in Distribution Systems of Electric Power Systems[A]. in: Proceedings of Eighth ACIS International Conference on SNPD[C]. 2007. 712-716.
- [54] 文福拴, 韩祯祥. 基于覆盖集理论和Tabu搜索方法的电力系统警报处理[J]. 电力系统自动化, 1997, 21(2): 18-24.  
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang. A New Approach to Alarm Processing in Power Systems Based upon the Set Covering Theory and Tabu Searcher Method[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21 (2): 18-24.
- [55] 韩祯祥, 钱源平, 文福拴. 基于模糊外展推理和Tabu搜索方法的电力系统故障诊断[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1999, 39 (3): 56-60.  
HAN Zhen-xiang, QIAN Yuan-ping, WEN Fu-shuan. Tabu Search Approach to Fault Diagnosis in Power Systems Using Fuzzy Adductive Inference[J]. J Tsinghua Univ: Natural Science Edition, 1999, 39 (3): 56-60.
- [56] Bi T S, Ni Y X, Shen C M, et al. A Novel ANN Fault Diagnosis System for Power Systems Using Dual GA Loops in ANN Training[A]. in: Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting, IEEE[C]. 2000. 425-430.
- [57] 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.
- [58] 张炳达, 马忠坤, 陈伟乐, 等. 基于故障群组合优化的变电站故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 135-139.  
ZHANG Bing-da, MA Zhong-kun, CHEN Wei-le, et al. The Fault Diagnosis for Substation Based on Optimizing the Combination of Fault-Masses[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 135-139.
- [59] 孙伟, 李林川, 卢庆聪, 等. 基于停电区域的电力系

- 统故障诊断的一种新模型[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 30-34.
- SUN Wei, LI Lin-chuan, LU Qing-cong, et al. A New Method for Power System Fault Diagnosis Based on Power Supply Interrupted Region[J]. Power System Technology, 2004, 28 (5) : 30-34.
- [60] Momoh J A, Ma X W, Tomsovic K. Overview and Literature Survey of Fuzzy Set Theory in Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1995, 10 (3) : 1676-1690.
- [61] Chin Hong-Chan. Fault Section Diagnosis of Power System Using Fuzzy Logic[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (1) : 245-250.
- [62] Min Sang-Won, Sohn Jin-Man, Park Jong-Keun, et al. Adaptive Fault Section Estimation Using Matrix Representation with Fuzzy Relations[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 19 (2) : 842-848.
- [63] Monsef H, Ranjbar A M, Jadid S. Fuzzy Rule-based Expert System for Power System Fault Diagnosis[J]. IEE Proceedings: Gener, Transm and Distrib, 1997, 144 (2): 186-192.
- [64] Cardoso G Jr, Rolim J G, Zurn H H. Interpretation of Remote Backup Protection Operation for Fault Section Estimation by A Fuzzy Expert System[A]. in: Power Tech Conference Proceedings, IEEE[C]. Bologna: 2003.
- [65] 孙宏斌, 张伯明. 能量管理系统中的电力信息学[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (2): 1-4.
- SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming. Electrical Information as Applied to Energy Management System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (2) : 1-4.
- [66] 孙宏斌, 张伯明, 汤磊, 等. 电力系统中基于信息量损失最小的决策原理[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (12): 9-13.
- SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, TANG Lei, et al. A Novel Optimal Decision Making Principle Based on Minimization of Information Loss as Applied to Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (12) : 9-13.
- [67] 汤磊, 孙宏斌, 张伯明, 等. 基于信息理论的电力系统在线故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23 (7) : 5-11.
- TANG Lei, SUN Hong-bin, ZHANG Bo-ming, et al. Online Fault Diagnosis for Power System Based on Information Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23 (7) : 5-11.
- [68] 冯永青, 孙宏斌, 朱成骥, 等. 基于信息理论与技术的地区电网辅助决策系统设计[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (4) : 58-62.
- FENG Yong-qing, SUN Hong-bin, ZHU Cheng-ji, et al. Design An Auxiliary Decision-Making System for Sub-transmission Power Network Based on Information Theory and Techniques[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (4) : 58-62.
- [69] 束洪春, 唐岚, 董俊. 多Agent技术在电力系统中的应用展望[J]. 电网技术, 2005, 29 (6) : 27-31.
- SHU Hong-chun, TANG Lan, DONG Jun. A Survey on Application of Multi-Agent System in Power System[J]. Power System Technology, 2005, 29 (6) : 27-31.
- [70] Hossack J A, Menal J, Stephen D J. A Multiagent Architecture for Protection Engineering Diagnosis Assistance[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003, 18 (2) : 639-647.
- [71] MAO Peng, WENG Han-li, Chen Bin. Study of Fault Diagnosis for Power Network Based on MAS[A]. in: Proceedings of International Conference on Power System Technology[C].2006.1-5.
- [72] McArthur S D J, Davison E M, Hossack J A, et al. Automation Power System Fault Diagnosis Through Multiagent System[A]. in: Proceedings of the 37th Annual Hawaii International Conference on System Sciences[C]. 2004. 947-954.
- [73] 朱永利, 卢锦玲, 卢敏, 等. 基于Multi-agent的电网故障诊断系统的研究[J]. 继电器, 2006, 34 (5) : 1-5.
- ZHU Yong-li, LU Jin-ling, LU Min, et al. Multi-agent Based Real-time Intelligent System for Power Systems Fault Diagnosis[J]. Relay, 2006, 34 (5) : 1-5.
- [74] 毛鹏, 许扬, 蒋平. 输电网故障诊断研究综述及发展[J]. 继电器, 2005, 33 (22) : 79-86.
- MAO Peng, XU Yang, JIANG Ping. Survey and Development on Fault Diagnosis in Power Systems[J]. Relay, 2005, 33 (22) : 79-86.
- [75] 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, 2006, 30 (8) : 98-103.
- GUO Chuang-xin, ZHU Chuan-bai, CAO Yi-jia, et al. State of Fault Diagnosis of Power System[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (8) : 98-103.
- [76] 鞠平, 左英飞, 文福拴, 等. 电力系统健康诊断[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (6) : 22-25.
- JU Ping, ZUO Ying-fei, WEN Fu-shuan, et al. Health Diagnosis of Power System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (6) : 22-25.
- [77] 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.
- WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang, TIAN Lei, et al. An Analytic Model and Genetic Algorithm Based Methods for Fault Diagnosis in Power Systems Part I: The Model and Method[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 1998,

10 (3) : 1-7.

[78] 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, 第二部分: 软件实现[J]. 电力系统及其自动化学报, 1998, 10 (3) : 8-14.

WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang, TIAN Lei, et al. An Analytic Model and Genetic Algorithm Based Methods for Fault Diagnosis in Power Systems Part II: the Software Implementation[J]. Proceedings of The CSU-EPSA, 1998, 10 (3) : 8-14.

作者简介:

林 圣 (1983-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统故障诊断; E-mail: linsheng-1@163.com

何正友 (1970-), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为小波分析在电力系统故障分析中的应用、新型继电保护原理、配网综合自动化;

钱清泉 (1936-), 男, 中国工程院院士, 从事电力监控系统及其自动化研究。

收稿日期: 2009-02-10; 修回日期: 2009-04-17

(上接第 112 页 continued from page 112)

参考文献

[1] 洪宪平. 走向网络化的远动系统[J]. 电力系统自动化, 2001, 27 (13) : 1-3.

HONG Xian-ping. Telecontrol System Tending Towards Network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 27 (13) : 1-3.

[2] 张岳匀, 何志伟. SCADA系统通信规约的标准化及建议[J]. 电力系统及其自动化学报, 2000, 12 (5) : 42-44.

ZHANG Yue-jun, HE Zhi-wei. Protocol Standardization of SCADA System and Advice to IT[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 12 (5) : 42-44.

[3] 潘莹玉. 我国电网调度自动化系统的发展与现状[J]. 继电器, 2000, 28 (6) : 58-62.

PAN Ying-yu. Development and Current Situation of Power Dispatching Automation System in China[J]. Relay, 2000, 28 (6) : 58-62.

[4] 王恒, 谢小荣, 童陆园, 等. 集中分层式安全稳定控制系统的开发及其在贵州电网中的应用[J]. 继电器,

2005, 33 (2) : 75-78.

WANG Heng, XIE Xiao-rong, TONG Lu-yuan, et al. Development of a Centralized Hierarchical Stability Control System and Its Application in Guizhou Power System[J]. Relay, 2005, 33 (2) : 75-78.

[5] 宋人杰, 王强. 组态软件通信接口在DCS仿真界面设计中的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (1) : 93-95.

SONG Ren-jie, WANG Qiang. Application of the Industrial Control Configuration Software Communication Interface in the Design of DCS Simulation Operation Contact Interface[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (1) : 93-95.

收稿日期: 2009-03-04; 修回日期: 2009-07-11

作者简介:

王 滔 (1982-), 男, 硕士, 从事电力系统自动化调试维护方面的工作; E-mail: wangtao\_8282@tom.com

邱 武 (1971-), 男, 学士, 工程师, 从事电力系统自动化调试维护方面的工作。

(上接第 133 页 continued from page 133)

[9] 梁广, 张勇军, 黎浩, 等. 变电运行人因事故分析的拟 REASON 模型[J]. 继电器, 2008, 36 (3) : 23-26.

LIANG Guang, ZHANG Yong-jun, LI Hao, et al. Quasi-reason Model for Human Errors Analysis in A substation Operation[J]. Relay, 2008, 36 (3) : 23-26.

[10] 陈海波. 国内外城市大面积停电分析及启示[J]. 广东电力, 2008, 21 (2) : 34-39.

CHEN Hai-bo. Analysis and Inspiration of Large-scale Blackout in Cities at Home and Abroad[J]. Guangdong Electric Power, 2008, 21 (2) : 34-39.

[11] 张锋. 预防和应对电网大停电事故的研究[J]. 华东电力, 2007, 35 (4) : 37-40.

ZHANG Feng. Prevention and Handling Measures for Blackouts[J]. East China Electric Power, 2007, 35 (4) : 37-40.

收稿日期: 2009-02-21; 修回日期: 2009-03-17

作者简介:

张良栋 (1974-), 男, 硕士, 高工, 主要从事配电网运行管理和电力营销工作;

石 辉 (1986-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定、运行与控制;

张勇军 (1973-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统无功优化和电压稳定、电力系统可靠性与规划等研究。E-mail: zhangjun@scut.edu.cn