

基于 MAS 的电网故障诊断系统的体系结构

丁士长¹, 翁汉珪², 毛鹏¹, 陈久林¹

(1. 江苏省电力试验研究院有限公司, 江苏 南京 210036; 2 华中科技大学电气工程系, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在对电网故障诊断理论研究和应用实际现状分析的基础上, 提出了一基于 MAS (Multi-Agent System) 的电网故障诊断模型, 此模型充分发挥 MAS 本身固有的协调异构智能体完成共同目标的能力, 来充分利用空间分布、性质分层的故障信息, 实现在线精确电网故障诊断。MAS 诊断模型在电网区域监控中心设置决策 Agent, 而按照空间分布的厂站端, 设置协作 Agent, 通过决策 Agent 和协作 Agent 之间的合作协商机制, 来实现基于区域电网全局各层故障信息的全局最优化诊断结果, 即最能够复现电网故障和解释故障现象的诊断结果。此模型可以依托于目前已构建的故障信息网络, 通过合作和管理型相结合的协调通讯方式来实现。理论分析和模拟系统测试证明了此诊断模型的可行性、有效性。

关键词: 电网; 故障诊断; MAS; 优化算法; 专家系统

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2006)21-0024-05

0 引言

快速、准确的输电网故障诊断结果可以为电力调度人员决策和保护、检修人员查找故障提供帮助, 有效地缩短故障处理时间, 是电网安全、稳定、经济运行的有效手段。电网故障诊断的理论研究已有十几年的历史, 在建模、算法等方面取得了重要的成果, 比较成熟的理论有基于优化算法的电网故障诊断^[1]和基于专家系统的电网故障诊断^[2]。相当多的文献仅局限于新的智能方法应用于此课题的尝试, 对于电网故障诊断模型的研究并未有实质性突破。另外, 随着电力系统的发展, 对电网诊断的需求以及实现电网诊断所必须的信息支撑条件等方面都发生了重大变化。在当前电网故障诊断研究成果的基础上, 结合计算机技术、人工智能技术等相关专业的研究成果, 对电网故障诊断理论以及诊断理论的现实实现做输入研究, 以解决理论和实际脱节的问题尤为重要。

MAS 系统是分布式人工智能领域的一个重要分支^[3, 4]。MAS 系统由具有类似结构的一个个独立单智能体, 按照拟人类社会或团体的组织形式组成, 通过相互之间的协商、合作、博弈等策略来实现复杂问题的求解。虽然目前对此系统的研究, 尤其是 MAS 系统中各智能体的组织结构形式、协商合作机制的研究还有待于进一步的提高。但 MAS 强大的求解能力, 引起了相关工作者的极大兴趣。此系统目前已广泛地应用于各工程界, 如计算机集成制造系统、交通系统、管理系统等。在电力系统行

业^[5~11], 此系统已被尝试性应用于继电保护^[6]、变电站综合自动化^[7]、协调控制^[8]、电力市场^[11]、电压控制^[10]等许多方向。纵观目前的 MAS 应用, 有相当多的文献是将 MAS 系统中的单 Agent 智能体作为一个功能模块, 或者是计算机网络专业中的代理来理解, 并未真正发挥 MAS 作为群集智能体所应用的功能。对于复杂任务的分解, 应当做到粒度适中, 使分担每个任务的单 Agent 相对独立, 具有自己的局部优化目标, 通过众多单智体的合作来实现问题的全局最优化目标。

本文在对当前电网故障理论研究做简单汇总的基础上, 分析了电网故障诊断研究和应用化进程中的不足。在此基础上提出了基于 MAS 的电网故障诊断模型。此模型中具体的单 Agent 智能体根据所处的位置的不同, 分别采用各自的电网诊断算法和模型, 由此充分发挥了 MAS 本身所固有的组织协调异构智能体完成共同目标的能力。而且, 按照电网管理运行组织特点构建的 MAS 诊断系统, 充分利用空间分布、性质分层的全局故障信息, 实现在线精确电网故障诊断。并给出了当前条件下的实现方案。

1 电网故障诊断分析

为更进一步深入研究电网故障诊断理论, 推进电网故障诊断理论的工程化实践。需要对实现电网故障诊断所必须的故障信息做全面、彻底的分析; 需要对以前的电网故障诊断模型的优点和不足, 尤其是对电网和技术的发展不相适应的特点做分析。以便于在此基础上提出更切合实际的诊断理论和模型。

1.1 实现电网故障诊断的信息支撑分析

以能够复现故障过程为目标的电网故障诊断势必需要故障后的开关和保护节点信息、SOE、保护故障报文和故障录波等所有涉及的故障信息。随着电力系统的发展,自动化、数字化、信息化等进程的不断推进,电力系统监控、管理、运行维护等过程都发生了重要变化。与故障分析相关的信息,除呈现出多样性、冗余性等特点外,最大的特点在于图 1 所示的层次性。故障信息的产生如图 1 所示,方向由左(原因层)向右(后果层),现场故障分析流程一般按照从右向左方向逐级分析:确定跳闸开关、查看开关对应保护装置、查看分析对应设备和对应时间区间内的录波资料,最后达到故障原因和事件时序能够解释各层故障信息为标准。

如果图中每个环节的可靠性都不为“1”(完全可靠)的话(现场实际也是如此),则后果层的行为只能借助原因层来分析,如开关误动、保护原理性误动(例如:变压器涌流现象导致保护误动,线路功率倒向导致保护误动等)等,所以仅利用某一层的故障信息很难实现理想的故障诊断,而研究基于全局关联信息的诊断技术具有更高的理论和现实意义。

另外,故障信息的产生和采集呈现极强的空间分层、分布性的特点。一般来讲,故障发生后的第一时间,开关和保护等的节点信息以遥信的形式经厂站 RTU 系统上传至监控中心的 SCADA 系统;随后,带有时标信息的 SOE 上传至监控中心 SCADA;作为故障分析重要信息支撑的微机保护的事故信息则经厂站端的保护管理机(即当前故障信息系统中的子站系统)集中上传于故障信息主站系统;作为故障分析最终裁决信息的故障录波器信息则由专门的录波网络来采集,或集中于故障信息系统的子站;对于各个厂站端,站内信息一般都集中于站内综合监控系统。而且不同级别的监控中心鉴于所关心的电压等级的不同,对低级别电压等级设备信息不予采集。

由实现电网故障诊断或分析的信息要求,以及这些信息的分布特点可知:仅靠安装于某点、某系统中的单个智能体无法实现理想的故障诊断;而将所有故障涉及到的信息集中采集,形成故障分析数据中心的想法目前也不太现实,且本身在理论上也会导致扩展瓶颈的弊端。

1.2 电网故障诊断模型分析及不足

电网故障诊断因系统规模、系统复杂程度、信息离散和不确定性等因素的限制,难以通过建立常规的数学模型来进行研究,智能化理论的研究和发展

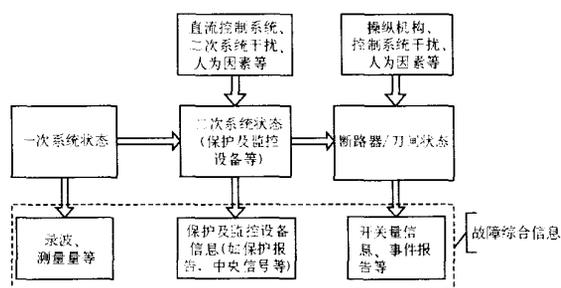


图 1 诊断源信息层次结构示意图

Fig 1 Hierarchical architecture of source information for fault diagnosis

为电力系统故障诊断技术研究开辟了新的途径。虽然电网故障诊断作为电力专业的一个研究方向始终引起研究人员的兴趣,且取得了许多有效的成果,但尚存在着一些不足:局部信息的限制。现有电网故障诊断策略的信息支撑皆受限于电力系统中的局部信息,如立足于调度中心 SCADA 系统的优化诊断模型仅采用了开关和保护的遥信信息,虽实现了监控区域的全局信息,但无法实现深层次故障诊断,且某些情况下,此类模型可能会出现多解的情况;基于变电站中故障录波器或综自系统所提供的遥信、时序或交流量信息的诊断策略,虽然能做到深层诊断,但对于相当多的涉及多厂站的故障(如线路故障等)情况,显然此策略又存在局部化的不足。研究重点的偏失。对于基于优化算法的电网故障诊断算法,相当多的文献未能在模型的构建上做深入研究,而着眼于新的搜索算法和当前模型思路上新智能方法的应用,虽然是有意义的尝试,但对于诊断理论的突破贡献不大;对于基于推理机制的诊断算法的研究,相当多的还停留于浅层推理阶段,如基于故障词典、故障树的专家系统,以及 Petri 网等诊断策略,尚需基于电网络模型的深层推理诊断算法,也需充分发挥引入的新智能方法的突出特点,而非浅层次的引入。诊断信息源特征的变化,导致诊断理论的不适应。一方面,由于电力系统的诸多因素,如高压电网系统中保护配置的双重化、多层次、多种类等特点,以及其他一次、二次监测设备的数字化实现,导致故障后信息量巨大,且出现大量冗余;另一方面,故障信息的丢失和噪音污染导致部分诊断信息不可信。

随着社会的发展,人们对电力系统的各项指标提出了更高的要求,如缩短故障停电时间、减小故障后影响范围等;另外,电力系统也朝着更高电压、大电网、交直流混合的趋势发展。所有这些形势,更加

需要精准的电网故障诊断结果为调度人员、保护检修人员在故障后提供有效的辅助决策。而且,随着电网监控手段的日益发展,在第一道安全防线失效后,人为反应已来不及的情况下,在线闭环电网故障诊断系统的投入对遏制事故波及范围的扩大具有重要的作用。

电网故障诊断理论和方法的研究现状和现实电网发展的不一致性,导致了目前的诊断方法难以实用化,也正是目前电网故障诊断研究持续活跃的重要原因。

2 基于 MAS 的诊断模型及实现

由以上的分析可以看出,对于电力系统故障诊断这一研究课题,采用单一的智能模式仅能解决某个或某些方面的问题,诊断性能有一定的提高,但不可能很好地解决电网故障诊断所面临的所有难题,甚至于一个方法的采用还带来了一些新的问题。由此,采用多种智能方法混合来实现电网故障诊断成为一个必然的研究思路。作为分布式人工智能领域的一个重要分支,MAS的研究和在工程界的成功推广和应用,为更好地构建电网诊断模型,利用全局全信息,通过组织异构群集智能体解决电网故障诊断提供了途径。

2.1 MAS 介绍^[3,4]

MAS系统是由许多单智能体 Agent组成的,通过类似于人类社会组织团体的协作机制来解决现实问题的一种聚集智能体系统,属于分布式人工智能研究领域。对于其中的单智能体 Agent在学术界和应用界还未达成一致的理解和认识,所以本文对此不作中文翻译,仍采用其英文名称来论述。在 Agent以及 MAS的深入研究中,从单个智能体发展引申到具有社会行为的群集智能的理念,使其具有了极强的复杂问题求解能力,从而引起了各行各业研究人员的极大兴趣,也被尝试性地应用于许多领域。

对单个 Agent智能体做拟人化的抽象和定义:一般应具备自治性、能动性、反应性等符合理性要求的固有特性;并且赋予其知识、信念、承诺、意图、义务等其他人类所具有的感性特征。依据人类思维的层次模型,可以粗略地将 Agent分为三类:反应型、认知型、复合式。每个 Agent作为单智能体具备相似的内部物理构架,当应用于不同的领域或承担不同的任务时,内部具有不同的推理和知识规则。

以 Agent智能个体为基本单位的 MAS的研究,充分表现出具有拟人类智能的单 Agent不仅存在于

个体思维活动中,将更多地体现于群体合作的人类社会。MAS更能体现人类社会智能,更加适合开放、动态的世界环境。这种更接近于人类社会本身自然特性的系统构建方式,对于复杂、分布、多目标问题的求解能力大大地超出了多个智能个体的简单相加。为更好地发挥 MAS的性能,其相互之间的协调机制的研究尤为重要,毕竟自然界本身就是一个矛盾的辩证组合体,是各部分、多因素协调博弈到一定目标的动态平衡。而且,MAS系统给整合具有不同实现机理和规则的分布的人工智能个体提供了可能。

相比于单智能体,在 MAS的研究中,Agent任务的分解和各 Agent体之间的交互机制的研究尤为重要。任务分解要粒度适当,既有相对对立性,具有自己的局部目标和任务体,又能使问题得到充分的分解和降阶。粒度太小,一则增加相互之间的信息交互压力,二则不具备独立个体思维能力;粒度太大,则对于复杂问题的求解得不到降阶、减维的目的,不能充分发挥 MAS作为一个群集智能组织体的优势。MAS的另外一个重要研究点是其组织、协调机制。正如我们现实的社会一样,一个个个体从事的工作也许微不足道,众多单个形成的组织或社会,通过有效的协调、组织机制,创造出精彩纷呈的一个个奇迹。而其中的沟通、交流、协调、合作、化解矛盾等体现在个体之间,个体和组织之间的交互关系对于单个体时时发生、至关重要。基于人类组织形式和机制的模拟,目前比较成熟、且有实用价值的 MAS协商算法有:合同网络协商、基于对策论的协商、多级协商等。总之,立足于本研究实际,研究单体之间关系和行为的方法理论,将使问题的求解获得更完美的全局最优。

2.2 基于 MAS 的诊断模型

通过电网故障诊断理论研究和实现条件的分析,以及 MAS的特点和应用介绍,我们可以看出,采用具有分布特性的 MAS来实现电网故障诊断,是有效利用分层分布全局故障信息、充分发挥优化诊断算法和专家系统诊断理论的有效途径。基于 MAS的电网故障诊断模型按照当前电网管理和运行的分级、分层机制,采用如图 2所示的分层组织结构。

在电网区域监控中心设置决策 Agent,而按照空间分布的厂站端,设置协作 Agent,协调组织机制如下:

1) 系统的启动:由决策 Agent的“事故总 遥信信号启动整个诊断系统,或由故障事件发生厂站的

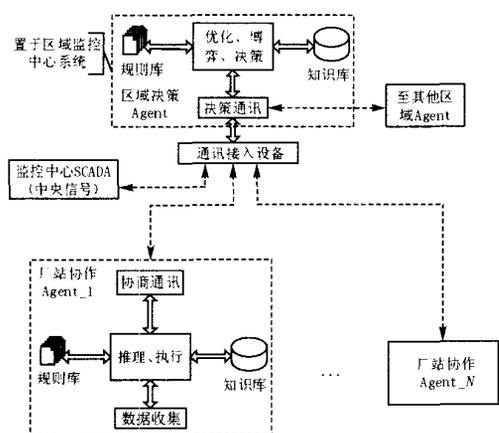


图2 基于MAS的电网诊断系统模型

Fig 2 Model of fault diagnosis system based on MAS

协作 Agent 主动上传申请启动整个诊断系统。

2) 决策 Agent 利用 SCADA 系统的开关量信息,采用式(1)的优化模型,产生诊断初始结果,作为诊断系统的社会认知结果,采用广播的形式发布到厂站端协作 Agent。

$$E(X) = \sum |B_j - B_j^*(p)| + \sum |P_k - P_k^*(X)| \quad (1)$$

式中: $X = [S, C, P]$, 表示系统条件的状态向量; S_i 表示第 i 个元件的状况; B_j, B_j^* 分别表示第 j 个断路器实际和期望状态; P_k, P_k^* 分别表示第 k 个保护的 实际和期望状态。

决策 Agent 具有全局信息,采用优化算法模型易于在解空间中尽快地把握全局最优解。避免了专家系统模型的规则库膨胀,故障实例无解的弊端。

3) 厂站端诊断协作 Agent 利用保护报文信息先采用专家系统做正向推理,如果推理结果与诊断社会认知结果一致,则说明本 Agent 的社会认可度为 1; 否则,以诊断社会认知结果为期望值做反向推理,以期望状态量和保护装置现有状态量的差异作为社会认可度(小于 1)。并将本 Agent 的社会认可度反馈给决策 Agent。

鉴于厂站端所对应的解空间比较小,规则固定,而具有深层次故障信息,所以更适合于采用专家系统的推理机制来做深层分析。

4) 决策 Agent 根据各协作 Agent 的响应,结合各 Agent 的权重系数 w 来计算社会综合反响度 F , 根据社会反响度的大小在解空间中修正社会认知结果,重复上述过程。其中的博弈函数为:

$$F(X) = \sum W_i H_i(X) \quad (2)$$

式中: X 为式(1)中的系统条件的状态向量, W_i, H_i 分别表示 Agent _{i} 在社会中的权重和对应于 X 的社

会认可度; F 则表示对于解 X 的社会综合反响度。当解唯一且较高时,则认定对应 X 为最终的社会认知结果。

5) 上一阶段的社会认知结果稳定后,决策 Agent 给相关协作 Agent 下发上传相关保护报文信息和涉及设备录波信息的指令;协作 Agent 根据上传指令,对本厂站内信息做分拣过滤,然后打包上传。由此,在信息量传输最小的情况下,实现相关故障信息的有效集中。

6) 故障时序分析。鉴于电网 SCADA 系统中的 SOE 信息时标具有全局统一时钟,而保护装置报文的时标绝对时间还存在偏差的现实情况,根据最终的诊断结果,以第一次故障为零时刻,按照既定规则,以 SOE 信息为主线,保护报文为详细解释,分析整理故障时序分析报告。

按照 MAS 诊断模型,可以实现基于区域电网全局各层故障信息的最优化诊断结果,即最能够复现电网故障过程和解释所有故障现象的诊断分析结果。

2.3 基于 MAS 的诊断系统的实现

此模型可以作为对应系统平台的子系统依托于目前已构建的故障信息网络,来实现 MAS 故障诊断。在诊断 MAS 中,底层通讯语言采用国际上比较成熟的 KQML (Knowledge Query Manipulation Language),外层通过封装和对目前电力系统通讯规约(如 103 等)的有效扩展,来最终实现 MAS 系统的整个通讯连接。

3 结语

鉴于 MAS 固有特点和电网诊断问题具有很好的结合点,我们以全局把握、局部判断、博弈权衡、最终决策的思路,构建了基于 MAS 的电网故障诊断模型,在此模型中,每个 Agent 都具有完备的诊断功能,是一个相对对立的诊断智能体,有别于早期 MAS 引入电力系统时,模块化分解应用 Agent 的情况。理论分析和初步的测试表明此模型具有很高的诊断性能指标,且易于扩展,完全适应于不同规模的电网。但在博弈函数构造和全局结果决策方面还需要做进一步的研究和探讨。

随着人工智能技术、应用数学技术、计算机技术等相关技术的研究深入,以及电力系统的发展,对目前未能很好解决的一些问题做重新思考和建模,势必得到新的研究成果,也必将推动研究成果的进一步实用化进程。

参考文献:

- [1] 文福拴, 韩祯祥. 基于遗传算法和模拟退火算法的电力系统的故障诊断[J]. 中国电机工程学报, 1994, 14(3): 29-35.
WEN Fu-shuan, HAN Zhen-xiang Fault Selection Estimation in Power Systems Using Genetic Algorithm and Simulated Annealing[J]. Proceedings of the CSEE, 1994, 14(3): 29-35.
- [2] 段振国, 高曙, 杨以涵. 一种电网故障智能诊断模型研究[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(6): 399-402.
DUAN Zhen-guo, GAO Shu, YANG Yi-han A Diagnostic Reasoning Model for Power System Failures[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(6): 399-402.
- [3] 薛宏涛, 叶媛媛, 沈林成, 等. 多智能体系统体系结构及协调机制研究综述[J]. 机器人, 2001, 23(1): 85-90.
XUE Hong-tao, YE Yuan-yuan, SHEN Lin-cheng, et al A Roadmap of Multi-Agent System Architecture and Coordination Research[J]. Robot, 2001, 23(1): 85-90.
- [4] 岑玲, 刘洁. Multi-agent的协作模型及其应用[J]. 计算机应用, 2001, 21(2): 8-11.
CEN Ling, LIU Jie Multi-Agent Cooperation Model and Its Application[J]. Computer Applications, 2001, 21(2): 8-11.
- [5] 刘红进, 袁斌, 戴宏伟. 多代理系统及其在电力系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(10): 45-52.
LIU Hong-jin, YUAN Bin, DAI Hong-wei Multi-Agent System and Its Application in Power Systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(10): 45-52.
- [6] Tomita Y, Fukui C, Kudo H. A Cooperative Protection System with an Agent Model[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1998, 13(4): 1060-1066.
- [7] 王成山, 余旭阳. 基于 Multi-Agent系统的分布式协调紧急控制[J]. 电网技术, 2004, 28(3): 1-5.
WANG Cheng-shan, YU Xu-yang Distributed Coordinative Emergency Control Based on Multi-Agent System[J]. Power System Technology, 2004, 28(3): 1-5.
- [8] 李兰芳, 刘开培, 胡宇航. 基于 Multi-Agent的分布式变电站监控系统体系结构[J]. 电网技术, 2003, 27(6): 26-28.
LI Lan-fang, LIU Kai-pei, HU Yu-hang Architecture of Multi-Agent Based Distributed Monitoring and Control System for Substations[J]. Power System Technology, 2003, 27(6): 26-28.
- [9] Talukdar S, Ramesh V C. A Multi-Agent Technique For Contingency Constrained Optimal Power Flows[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(2): 855-861.
- [10] Wang H F. Multi-agent Coordination for the Secondary Voltage Control in Power-system Contingencies[J]. IEE Proc—Gener, Transm, and Distrib, 2001, 148(1): 61-66.
- [11] 程瑜, 张粒子, 郑华. 基于多 Agent协同技术的用电需求预测系统的设计[J]. 电网技术, 2004, 28(5): 50-54.
CHENG Yu, ZHANG Li-zi, ZHENG Hua Design of Power Demand Forecasting System Based on Multi-Agent Cooperative Technique[J]. Power System Technology, 2004, 28(5): 50-54.

收稿日期: 2006-06-16; 修回日期: 2006-08-04

作者简介:

丁士长(1980-),男,硕士,工程师,研究方向为变电站综合自动化系统研究及调试等;

翁汉珪(1980-),女,博士,研究方向为电力系统故障分析和继电保护; E-mail: honey_weng@163.com

毛鹏(1973-),男,博士,高级工程师,研究方向为电力系统故障分析、继电保护及电网故障诊断等。

Architecture of fault diagnosis for power network based on MAS

DING Shi-chang¹, WENG Han-li², MAO Peng¹, CHEN Jiu-lin¹

(1 Jiangsu Provincial Electric Power Research Institute Co., Ltd, Nanjing 210036, China;

2 School of Electrical Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: On basis of the fundamental researches and the analysis of existing application of the power system fault diagnosis, a model of power network fault diagnosis based on MAS (Multi-Agent System) is proposed. MAS has its own inherent coordinated isomeric intelligent bodies. The model exploits the ability these intelligent bodies can achieve the common goals to make full use of the spatial distributed and qualitative layered fault information. Then it can realize the on-line power system fault diagnosis accurately. MAS diagnosis model places the decision-making Agent in the local supervisory control center of the power network and the cooperative Agent in the spatial distributed substation terminal. By use of the negotiatory cooperation mechanism between decision-making Agent and cooperative Agent, the diagnosis results of global optimization based on the fault information of local power networks can be obtained. Supported by the existing fault information network, this model can be achieved by means of cooperative communication. The feasibility and effectiveness of the model are verified with the theoretical analysis and analogue system tests.

Key words: power network; fault diagnosis; MAS; optimization algorithm; ES