

# 基于 Multi-agent 的电网故障诊断系统的研究

朱永利<sup>1</sup>, 卢锦玲<sup>1</sup>, 卢敏<sup>2</sup>, 王平<sup>1</sup>

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 河北 保定 071003;

2. 浙江电力调度通信中心, 浙江 杭州 310007)

**摘要:** 电网故障诊断智能系统能够辅助调度人员快速判断故障元件, 起到缩短事故处理时间, 防止事故扩大的作用。该文提出了一种基于多 Agent 的电力系统实时故障诊断方法和系统结构, 将多线程技术应用于 Agent 的设计, 并采用 PROLOG 与 JAVA 混合编程。还给出了具体实现方法以及实验结果。实验表明多 Agent 故障诊断方法是一种有效的电力系统诊断方法, 可有效地提高诊断系统对于故障事件的反应性能, 在外界环境变化较大时可自动放弃当前的诊断目标。

**关键词:** 多智能体系统; 电力系统; 实时故障诊断; 人工智能

**中图分类号:** TM711 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)05-0001-04

## 0 引言

电网实时故障诊断能够辅助调度员及时地判断故障元件, 使其在事故处理中做到心中有数, 从而有助于防止事故扩大。长期以来, 电网故障诊断系统一直属于许多电力系统学者的研究热点, 并取得了一些研究成果<sup>[1~6]</sup>, 但是由于受当时研发方法的限制, 相应的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分析或判断后方能再去处理新的事件。

为了提高故障诊断的实时性, 本文在文献 [1] 推断可能故障与最终确定故障过程的基础上, 引入了多 Agent 技术。多 Agent 技术是在分布式并行处理技术、面向对象技术、计算机网络技术发展的基础上发展起来的, 它的分布性、实时性、反应性特点符合电力系统故障诊断对于事件的快速反应的要求。然而, 目前电力专家们研究的较多的是 Agent 技术在变电站故障诊断中的应用<sup>[7~9]</sup>, 对于 Agent 在电网故障诊断方面的应用研究还是比较少。Agent 的自身特点决定了使用 Multi-agent 技术构建的电网故障诊断系统具有对电网事件的适宜反应速度, 更有效地利用分布式系统中的信息、知识和计算资源。本文提出一种基于 Multi-agent 的电网故障诊断系统结构, 并分析了协作诊断过程与具体 Agent 结构与实现。

## 1 基于 Multi-agent 的电网故障诊断系统的结构设计

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: 电网接线图生成 Agent、诊断 Agent、知识管理 Agent、任务控制 Agent、诊断任务分解 Agent、实时数据获取 Agent、用户接口 Agent, 系统总体结构如图 1 所示。各 Agent 的功能描述如下。

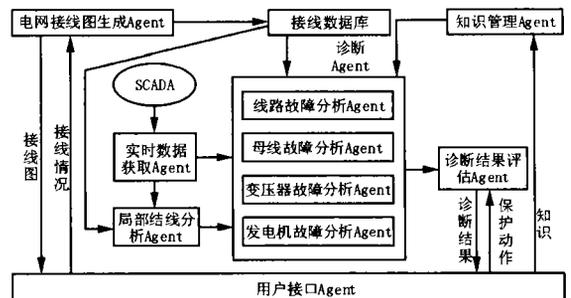


图 1 基于 Agent 的电力系统故障诊断系统结构

Fig 1 Structure of Agent-based fault diagnosing system of power systems

1) 实时数据获取 Agent 从 SCADA 中收集诊断对象的状态数据, 同时监听故障跳闸事件。当出现这种事件报警时, 立即唤醒电网局部结线分析 Agent 和诊断 Agent。

2) 用户接口 Agent 提供人机交互界面。用户通过该 Agent 将电网接线情况和诊断知识分别输入到电网接线图生成 Agent 和知识管理 Agent 中。

3) 诊断 Agent 由实时数据获取 Agent 唤醒后, 启动 4 种设备故障分析 Agent 并行工作, 对于电网停电区域中的各个一次设备是否故障进行评判。

4) 局部结线分析 Agent 根据故障跳闸信息确定停电区域, 并对区域内的厂站主接线进行当前结线分析, 为诊断 Agent 提供故障判断区域和区域内各节点的连通情况。

5)诊断结果评估 Agent负责对各个诊断子 Agent的故障判断结果进行综合评价,确定故障设备(单一或多重)。

6)电网接线生成 Agent在接收了从用户接口 Agent传来的接线拓扑描述信息后,允许手动生成电力系统网络接线图,自动生成厂站接线图,并将接线描述信息网络接线图各元件的图标信息存放在接线数据库中,以便诊断 Agent诊断随时读取。同时,在发生故障跳闸时,诊断 Agent可快速调用网络接线图并将故障跳闸区域显示在屏幕上。

7)知识管理 Agent负责知识库的维护和管理,给诊断 Agent提供诊断知识。除了目前的知识编辑接口功能外,该 Agent应最终具备示例学习的功能。

## 2 多 Agent系统的协作诊断过程

建立多 Agent系统的目的在于解决由单个 Agent难以处理的复杂问题,即任务在时间或空间上的复杂性超越了个体的能力,仅依靠个体行为的实现是不可能、不经济、不完整或不精确的。在多 Agent系统中,每个 Agent在完成自己任务的同时,必须与其他 Agent合作以完成全局任务。

在本系统中,用户接口 Agent负责生成电网接线图,并将大量的电网主接线信息放入到数据库中以便诊断 Agent读取。知识管理 Agent负责获取电网诊断知识。实时数据获取 Agent取得实时数据并监测事故,一旦有事故跳闸报警,实时数据获取 Agent就唤醒正常时休眠的诊断 Agent。诊断 Agent借用用户接口 Agent、实时数据获取 Agent和知识管理 Agent中的数据 and 知识进行故障诊断。诊断 Agent将各电网一次设备故障分析 Agent的诊断结果送给诊断结果评估 Agent进行评估<sup>[1]</sup>,最终确定故障设备。

## 3 Agent的结构设计

Agent是一种在分布式系统或协作系统中能持续自主地发挥作用的计算实体。一个 Agent必须具有四个特点:反应性、自主性、预动性以及社会性。

下面以诊断 Agent中各子 Agent的构造为例,介绍 Agent的结构。

根据电力系统实时故障诊断的特点,将故障分析 Agent划分为专家系统部件、通信部件、计划部件、接口部件。结构图如图 2所示。各部件功能描述如下。

1)专家系统部件:一个包含知识库、数据库和推理机的专家系统,负责对故障进行诊断。不同的

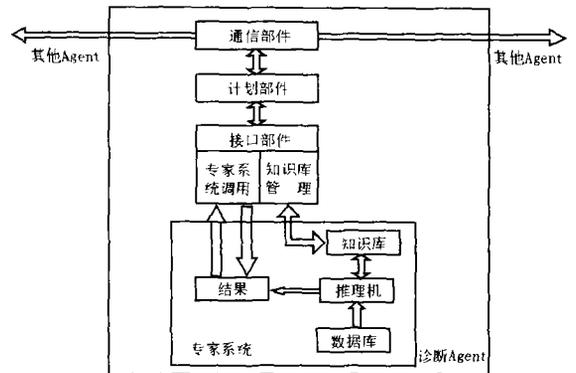


图 2 故障分析 Agent 结构图

Fig 2 Structure of diagnosing Agent

诊断子 Agent由于诊断任务以及诊断方法的不同,它的专家系统部件也不相同。

2)通信部件:负责与其它 Agent进行信息交互。它的基本作用是按照 KQML 语法规则形成 KQML 消息或解释 KQML 消息,并将逻辑地址转换为物理地址,根据物理地址打包发送 KQML 消息或是解包解释 KQML 消息。

3)计划部件:由任务控制模块、黑板模块、协作模块几个部分组成,负责对本系统任务和外来任务进行分析、优化、监控以及执行。任务控制模块保存了对诊断 Agent能力的描述、任务控制策略以及整个 Multi-agent系统方法论知识的表述。它能够对自身或其它 Agent的请求进行分析,做出相应的动作,改变自身或外界的状态,以满足任务的需要。黑板模块负责整个 Agent内部的信息交流。协作模块内部存储着一些协作机制,它应用这些协作机制协调 Agent内部各部件以及各个 Agent间的合作。

4)接口部件:包括知识管理接口和专家系统调用接口两部分。知识管理接口负责知识库的创建、维护;专家系统调用接口负责调用专家系统,得到诊断结果。

## 4 电网故障诊断的设计与实现

鉴于目前电网调度中心继电保护信号不完备,多数一次设备的保护信号只是一个综合信号,未区分是哪一种保护动作,系统的故障诊断采用以开关跳闸信号为主,保护信息为辅的方法。首先系统对各种故障设立模型组成故障模型库;然后将故障信息与故障模型库中的模型进行匹配,从而快速得到可能故障;得到可能故障后,调用故障仲裁知识,对基本故障进行裁决,最终得到故障诊断结果。

故障模型按故障设备的类型划分可分为母线故障、线路故障、发电机和变压器故障四种<sup>[1]</sup>,四种故障模型分别存放在四个诊断子 Agent中。本文在 WINDOWS 2000环境下,采用 PROLOG和 JAVA相结合的方法,利用多线程技术实现诊断 Agent,以提高 Agent对于电网事件的响应能力。

#### 4.1 PROLOG与 JAVA

由图 2可知诊断 Agent分为专家系统部件、通信部件、计划部件、接口部件 4部分。其中专家系统部件由 PROLOG编写,其它 3个部分用 JAVA 语言编写。

在专家系统部件开发上使用 PROLOG语言。PROLOG语言是一种说明性语言,是设计人工智能程序和专家系统的非常重要的一种工具,只要给出求解问题所需要的事实和规则,PROLOG将使用演绎推理的方法去解决所要解决的问题。这与传统的过程性编程语言(如 C)形成了鲜明的对照。在一个特定应用中,典型情况下 PROLOG程序只需要对应 C++程序的十分之一,能够大幅度地缩短开发周期。

在系统其它部件开发上使用 JAVA语言。JAVA为实现友好的人机界面与系统网络化提供了基础,同时,其卓越功能和内部机制为 Agent开发提供了便利的条件。首先, JAVA通过同时支持进程和线程体现了 Agent的自主性。Agent作为自主的程序或进程,总是在等待,时刻准备响应用户的请求或环境的改变。其次, JAVA虚拟机提供了一个相同的虚拟环境,允许 Agent在不同的硬件系统中移动,实现了 Agent的可移动性。另外 JAVA还提供了远程方法调用 RMI(Remote Method Invocation)和对象串行化(Object Serialization)这两种接口来开发分布式系统,有利于 Agent的移动。

由此,采用 PROLOG和 JAVA联合编程的方法开发 Agent可以弥补缺点,发挥优势,达到快速开发 Agent提高 Agent质量的目的。

#### 4.2 多线程

线程是指程序中能顺序执行的一个序列,是进程内部的最小执行单元,有时也被称为轻量级进程,系统创建进程后,就自动执行该进程的一个主线程,线程具有与进程相类似的执行状态及状态转换能力。

多线程是通过系统的调用使几个具有不同功能的线程并发运行。系统中,多个线程并发地运行于同一进程中,一个进程的所有线程都在该进程虚拟地址空间中,使用这些虚拟地址空间的全局变量和

系统资源,在创建线程时不必重新建立和复制数据,线程的建立与线程间的切换速度大大优于进程。一个多线程系统在提高系统的 I/O速度、有效利用系统资源、改善计算机通信功能以及发挥多处理器硬件功能方面显示了巨大的优势。同时,由于 Java语言对多线程从语言一级提供了支持,可由语言和运行系统联合提供对共享数据段的管理功能和同步机制,使得多线程并程序序设计相对比较容易。

在本文提出的故障诊断系统中,诊断 Agent的专家系统部件是由 PROLOG语言编写的。PROLOG内部推理机是由合一和回溯机制构成,它只有通过不断地对程序中的子句、谓词进行合一、回溯才能找到令人满意的结果。在串行思想基础上建立的 PROLOG系统,它的计算量与求解规模呈级数关系增长,推理极其耗时,因此在系统中引入多线程技术是必要的,它能使推理过程并列进行,并可随时监听来自实时数据获取 Agent送来的故障跳闸报警信息,一旦有新的报警项目出现,则自动放弃原来的推理,重新进行新的故障分析过程。

实时数据获取 Agent从 SCADA系统获知故障跳闸信息以后,立即同时启动诊断 Agent和局部结线分析 Agent,四类故障诊断 Agent按照多线程工作。

## 5 系统测试结果

本文的测试对象是辽西地区的部分电网,图 3是该电网故障后的跳闸情况。调度中心的实时数据获取 Agent已经从 SCADA收到了故障跳闸信息,它同时启动诊断 Agent和电网局部结线分析 Agent,可判断出停电区域为图中除“朝阳上”母线及其所连的“朝西线”和“朝阳 #1 机组”。这样,图中其它一次设备均为可能故障元件。三个诊断子 Agent分别进行判断得到可能故障如表 1、表 2所示。

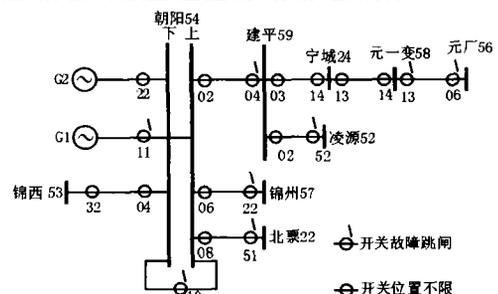


图 3 辽西部分电网故障跳闸举例

Fig 3 Fault example in Liaoxi Electric Network

表 1 线路故障分析 Agent 诊断初步结果

Tab 1 The initial result of line diagnosing Agent

故障设备	类型	跳 闸 开 关	拒动开关	迟动开关
1 元元	线路	5813 5606		
2 朝北	线路	2251 5722 5904 5410 5411	5408	
3 朝锦	线路	5722 5904 2251 5410 5411	5406	
4 朝建	线路	5904 5722 2251 5410 5411	5402	

表 2 母线故障分析 Agent 诊断初步结果

Tab 2 The initial result of bus diagnosing Agent

故障设备	类型	跳 闸 开 关	拒动开关	迟动开关
1 朝阳上	母线	5410 5411 2251 5404 5722	5408 5402	5406

表 3 机组故障分析 Agent 诊断初步结果

Tab 3 The initial result of generator diagnosing Agent

故障设备	类型	跳 闸 开 关	拒动开关	迟动开关
1 机组 #1	机组	5411		

将初步结果传送到诊断结果评估 Agent 进行综合判断,按动作开关集合是否相交,将上述三个表中的可能故障分为两组,即“元元线”为一组,其余为另一组。由于“元元线”不与其他故障的条件相关联,故可确定它为一故障元件。其它几组故障需提问保护动作情况(若 SCADA 提供保护动作情况,则可直接利用),设“朝锦线”5722 开关高频和“朝阳母线”保护动作,其它线路无瞬时保护动作,可得到最终故障分析结果如表 4 所示。应当指出“朝阳母线”也是很可能的候选故障,但它有两个开关未跳闸,所以未列入候选故障。

表 4 故障分析最终结果

Tab 4 The final result of fault diagnosing

故障设备	类型	跳 闸 开 关	拒动开关	迟动开关
1 元元	线路	5813 5606		
2 朝锦	线路	5722 5904 2251 5410 5411	5406	

## 6 结论

为了适应电力系统故障诊断对象网络分布化、故障种类多元化、专家经验集成化的发展需要,本文将基于 Multi-agent 的诊断技术应用于电力系统诊断,将多线程技术应用于 Agent 的设计,并采用 PROLOG 与 JAVA 混合编程。Multi-agent 技术的应用可有效地提高诊断系统对于故障事件的反应性能,在外界环境变化较大时可自动放弃当前的诊断目标。实验表明基于 Multi-agent 的故障诊断方法是一种有效的电力系统诊断方法。

## 参考文献:

- [1] ZHU Yong-li, YANG Yi-han, et al An Expert System for Power Systems Fault Analysis[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(1): 503-509.
- [2] 霍利民,朱永利,等.一种基于贝叶斯网络的电力系统可靠性评估新方法[J].电力系统自动化,2003,27(5):36-40.
- [3] 赵爽,等.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.
- [4] 史述红,等.城市 110 kV 电网故障元件的快速识别[J].电网技术,2001,25(6):37-40.
- [5] 刘青松,等.基于正反向推理的电力系统故障诊断专家系统[J].电网技术,1999,29(9):66-68.
- [6] 孙雅明,等.超高压变电站在线故障诊断专家系统[J].中国电机工程学报,1992,12(3):51-57.
- [7] Khosla R, Li Q. Multi-layered Multi-Agent Architecture with Fuzzy Application in Electrical Power Systems[A]. Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems 2002. 209-214.
- [8] 秦红霞,等.基于面向对象技术的变电站故障诊断及恢复处理专家系统:(一)总体设计与建模[J].电力系统自动化,1996,20(9):17-21.
- [9] 秦红霞,等.基于面向对象技术的变电站故障诊断及恢复处理专家系统:(二)故障诊断及恢复处理[J].电力系统自动化,1996,21(2):37-49.

收稿日期: 2005-07-18; 修回日期: 2005-09-13

作者简介:

朱永利(1963-),男,教授,博士生导师,研究方向为人工智能和电网调度自动化;E-mail: yongliw@heinfo.net

(下转第 28 页 continued on page 28)

- 50
- [2] 韩英铎,王仲鸿,陈准金. 电力系统最优分散协调控制 [M]. 北京:清华大学出版社, 1997.  
HAN Ying-duo, WANG Zhong-hong, CHEN Huai-jin. Optimal Dispersion and Coordinated Control of Power System [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.
- [3] 张凯锋,戴先中. 电力系统分散控制 [J]. 电力系统自动化, 2003, 27(19): 86-90.  
ZHANG Kai-feng, DAI Xian-zhong. Decentralized Control in Power Systems [J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(19): 86-90.
- [4] 谢小荣,崔文进,唐义良,等. 大型电力系统特定信息结构下的最优控制 [J]. 清华大学学报, 2000, 40(7): 20-23.  
XIE Xiao-rong, CU I Wen-jin, TANG Yi-liang, et al. Optimal Control Under a Given Information Structure for Large-scale Power Systems [J]. Journal of Tsinghua University, 2000, 40(7): 20-23.
- [5] 谢小荣,夏祖华,崔文进,等. 考虑信息结构约束的协调型非线性优化励磁控制 [J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 1-5.  
XIE Xiao-rong, XIA Zu-hua, CU I Wen-jin, et al. Coordinated Nonlinear Optimal Excitation Control with Information Structure Constraint [J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(1): 1-5.
- [6] 卢强,王仲鸿,韩英铎. 输电系统最优控制 [M]. 北京:科学出版社, 1984.  
LU Qiang, WANG Zhong-hong, HAN Ying-duo. Optimal Control of Power Transmission System [M]. Beijing: Science Press, 1984.
- [7] 谢小荣,崔文进,唐义良,等. 求解扩展 Levine-Athans方程组的直接迭代算法 [J]. 清华大学学报, 2001, 41(3): 1-4.  
XIE Xiao-rong, CU I Wen-jin, TANG Yi-liang, et al. Direct Iterative Algorithm to Solve the Extended Levine-Athans Equations [J]. Journal of Tsinghua University, 2001, 41(3): 1-4.
- [8] Kundur P. Power System Stability and Control [M]. McGraw-Hill, 1994.

收稿日期: 2005-07-06; 修回日期: 2005-07-29

作者简介:

杨晓静 (1980-),女,硕士,研究方向为电力系统运行、分析与控制; E-mail: yangxiaojing0601@163.com

赵书强 (1964-),男,博士,教授,研究方向为电力系统稳定分析与控制,电力系统谐波分析;

马燕峰 (1978-),女,硕士,助教,研究方向为电力系统运行、分析与控制。

### Coordination of excitation control with information structure constraint in multimachine power system

YANG Xiao-jing, ZHAO Shu-qiang, MA Yan-feng

(Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** This paper proposes a new approach to coordinated design of excitation controller under information structure constraint. Based on the concept of control information structure, design of the excitation controller is formulated into the optimal control problem with a given information structure. Then the method of minimum error excitation is extended to solve this problem and find the feedback gain matrix. Simulation results show that the resulted excitation control scheme which adds valuable remote signals to decentralized information structure have advantage over decentralized coordinated excitation control in improving oscillation damping ability and system stability.

**Key words:** power system; information structure; excitation control; method of minimum error excitation

(上接第 4 页 continued from page 4)

卢锦玲 (1971-),女,副教授,博士研究生,研究方向为人工智能在电力系统中的应用;

卢敏 (1980-),女,硕士,从事电力系统调度自动化系统的开发和维护工作。

### Multiagent based real-time intelligent system for power systems fault diagnosis

ZHU Yong-li<sup>1</sup>, LU Jin-ling<sup>1</sup>, LU Min<sup>2</sup>, WANG Ping<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control under Ministry of Education, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Zhejiang Power Dispatching and Communication Center, Hangzhou 310007, China)

**Abstract:** A real-time fault diagnosing system on power systems can assist dispatchers to recognize faulty elements, shorten the time of dealing with a blackout accident and avoid its enlarging. A new multi-agent based approach and systematic structure of real-time fault diagnosis on a power system are proposed in the paper, multithreading techniques are used in the design of the corresponding Agents of the proposed system. The mixed programming of PROLOG and JAVA is adopted to implement the system. Experiments on the developed prototype proposed system show that the new approach for fault diagnosis is feasible. It can improve the reactivity of the system to blackout incidents in a power system, and give up the present diagnosing objective when its environment changes largely.

**Key words:** multi-agent system; electric power system; real-time fault diagnosis; artificial intelligence