

发电机局部放电在线监测 Multi-Agent 系统研究

钱 勇, 黄成军, 黄方能, 陈 陈, 江秀臣

(上海交通大学电气工程系, 上海 200240)

摘要: 为了解决局放信号自身和监测系统框架方面的诸多问题, 笔者将分布式人工智能技术应用于发电机局部放电在线监测, 构建了一个局部放电在线监测 Multi-Agent 系统。针对局放数据评估中的预处理、特征提取、趋势和指纹分析, 本文分别给出了相应的处理方法及流程, 基于此, 给出了构建整个系统的框架及单个 Agent 的设计细节。分析表明, 所设计的 Multi-Agent 系统相比其他局放在线监测系统有诸多优点。

关键词: 发电机; 局部放电; 多代理; 监测

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2008)01-0011-04

Investigation of Multi-Agent Based Online Partial Discharge Monitoring System for Generator

QIAN Yong, HUANG Cheng-jun, HUANG Fang-neng, CHEN chen, JIANG Xiu-chen

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In order to solve the problems concerning the partial discharge and the framework of monitoring system, artificial intelligence was applied to the partial discharge online monitoring for generator, and a Multi-Agent based online PD monitoring system was thus established. For the issues existing in partial discharge evaluation, such as preprocessing, features extraction, trend and fingerprint analysis, corresponding methods and schemes were described, and furthermore, the framework of the Multi-Agent based system and detailed design of each Agent were depicted. Compared to other PD monitoring systems, the present Multi-Agent based online PD monitoring system gains many advantages.

Key words: generator; partial discharge(PD); Multi-Agent; monitoring

0 引言

构建局放在线监测系统是实现绝缘状态监测的重要途径。但是在局放信号自身和监测系统框架两方面, 目前还存在诸多的问题。局放信号典型的问题是数据的预处理及解释, 局放受诸多因素的影响, 其解释是一个典型的不确定性问题。局放监测系统框架典型的问题是缺乏灵活性, 局放的诊断需要结合多种先进的技术, 必须能够及时对系统进行更新, 此外, 局放的诊断还需要综合其他的监测技术, 要求系统可以很方便地添加或删除新的监测技术。

Multi-Agent 技术是人工智能领域近年来研究的热点之一。相比其他的技术, Multi-Agent 为系统集成提供了一种有益的框架, 这种框架结构灵活, 可以根据要求进行扩展。此外, Multi-Agent 允许开发更智能和自动化的功能。该技术包含有当前自动诊断和状态监测要求的所有属性, 具有广阔的应用前景。

笔者基于 Multi-Agent 构建了一个发电机局放监测系统, 该系统支持局放数据的采集和解释, 并具有扩展性, 可以结合其他监测技术进行综合诊断。

1 局放监测系统的功能设计

1.1 要求分析

首先, 局放数据需要进行必要的抗干扰预处理, 而且需要解释的数据量很大, 不可能依靠技术人员去完成这项工作, 因而, 监测系统必须具备自动处理及诊断的功能; 其次, 监测的数据是沿着网络和电力设备分散分布的, 这会产生严重的通信和分布解释问题, 因而, 监测系统不能简单地采用集中处理的架构; 第三, 为了提供一个正确的诊断结论, 某些数据源是需要集中到一起进行解释的, 局放监测只是诸多监测技术中的一种, 其他的技术如电气负荷、超声测量等都是很有益的补充, 因而监测系统应该具备与其他监测系统或数据源进行良好交互的能力; 最后, 随着监测技术的发展, 以后会出现新的监测和解

收稿日期: 2007-03-05; 修回日期: 2007-09-11

作者简介: 钱 勇(1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为大型电气设备在线监测和故障诊断、电力电子技术在电力系统中的应用。

释技术, 如何将新的监测和解释技术融入已有的系统, 方便地对原来的系统进行更新是构建监测系统时必须考虑的问题。

综合上述的问题, 可以确定一个局放在线监测系统应该具备如下的功能: ①自动采集和处理相关的数据; ②自动解释局放数据, 判断基本的故障; ③能通过其他的相关数据对诊断结果进行确证; ④具备扩展性和灵活性, 可以很方便地增加或更新监测和解释技术。

在上述的功能要求中, 扩展性对决定系统的使用寿命是至关重要的。具有扩展性的系统, 当新型的检测数据和解释技术出现时, 能够通过系统结构的扩展提供有效的支持。基于这样的要求, 构成系统的各项功能部分应该是独立的, 通过合作完成最终的监测目的。

1.2 监测系统功能设计

局放的诊断过程主要包括 4 个部分: 预处理、特征提取、数据解释和确证, 见图 1。

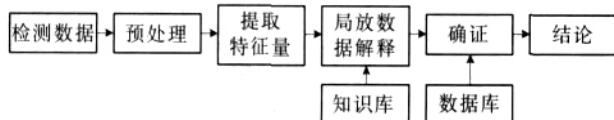


图 1 局部放电诊断流程图

结合图 1 和上述分析可知, 局放在线监测系统应该是一个“分层”系统。按照总体目标, 对各个功能模块进行分组。在结构上, 监测系统采用分布模块, 这样的结构不受实际设备物理位置的限制。数据处理模块可以直接安装在设备上。此外, 系统可以根据自身的要求设计模块, 只允许相关的数据和信息进入通信系统, 避免把所有的数据都发往一个处理中心的做法。

根据实际的数据处理流程(见图 1), 监测系统可以分为 5 个层次: ①预处理层。对检测数据中的干扰进行抑制; ②数据层。提取需要的各种特征参数; ③解释层。运用各种解释技术对局放特征参数进行解释; ④确证层。通过其他的监测数据进行确证; ⑤信息层。向相关人员提供诊断结果。

每层中的模块需要一些设备运行与故障特征相关的基本知识。系统能够集成监测数据和数据源, 如油温、电气负荷、局放、振动等。此外, 还应包括相关的维修和检修记录。

2 Multi-Agent 监测系统的设计

Multi-Agent 系统模仿人类社会的组织结构, 将多个具备独立解决问题的 Agent 组合起来, 以达到协作解决问题的目的。

就局放监测而言, Multi-Agent 为数据采集和诊断提供了灵活的框架, 但 Multi-Agent 并不是仅提供集成功能。Multi-Agent 系统包括许多独立的软件模

块(Agent), 具备 4 个关键的特征: 自治性、社会性、反应性和自觉性。在工程上, 自治性意味着每个 Agent 可以独立运行, 连续执行它所分配的任务; 社会性意味着每个 Agent 能够与其他 Agent 进行协作和通信, 能支持状态监测中的数据和信息交换; 反应性和自觉性表明, Agent 具备对环境做出反应的能力, 能自觉地采取措施解决问题, 确保按初始要求运行^[1]。因而, Multi-Agent 包含了监测系统要求的所有属性。

Multi-Agent 系统的设计一般遵循以下的几个步骤^[1-3]: ①任务分解: 将高层要求转化成分层的任务和子任务; ②具体 Agent 的建模: 确认和设计独立和自治的 Agent, 用以执行前面确定的任务和子任务; ③知识本体设计: 用于数据和信息交换的数据模型; ④Agent 之间交互的定义。

笔者设计的 Multi-Agent 系统沿用文[4]的名称-COMMAS。

2.1 监测系统的任务分解

在设计监测系统之前, 需要对系统的要求进行分析并获取相关的知识; 在此基础上, 对总体任务进行分解, 分为若干个易于实现的子任务或子任务层。

监测系统的知识主要来源于: ①国际和国家标准; ②国家电力公司的操作规则; ③专家的咨询结论; ④科学文献。系统任务的分解则主要依靠局放研究人员的经验。

根据获取相关的知识及经验, 笔者设计出了如图 2 所示的任务结构。

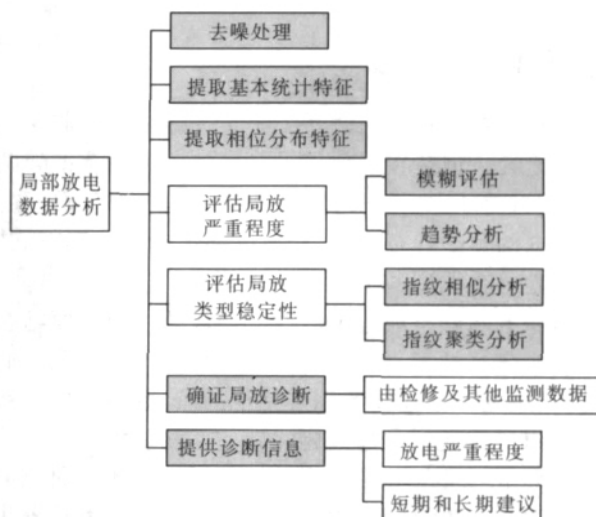


图 2 Multi-Agent 系统任务层次及分解

2.2 单个 Agent 的具体设计

Agent 的具体设计需要确认哪些功能模块是独立和自治的 Agent。设计一个系统时, 是将多个功能集成在一个 Agent 里, 还是分别构造 Agent, 需要做出协调选择, 这是一个依赖实际应用的问题。如图 2 中由阴影突出显示出来的功能被选作独立的 Agent, 这些 Agent 包含所有底层的功能, 这样选择

是由前面的初始要求决定的。基于这些独立的功能，通过 Agent 组织合适的状态监测功能层。

与 1.2 节一致，笔者设计的 Multi-Agent 系统一共包含 5 层，分别为预处理层、数据层、数据解释层、确证层和信息层，见图 3。

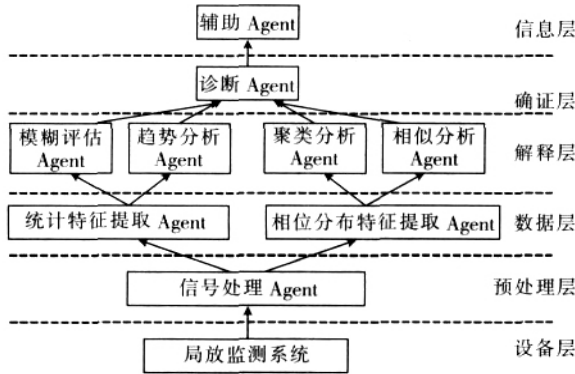


图 3 发电机局放在线监测 Multi-Agent 系统

(1) 预处理层 Agent

预处理层主要用于抑制原始采样数据中的噪声干扰。局放检测的现场存在的噪声干扰大致可分为 3 类：白噪声干扰、离散谱干扰和脉冲型干扰。这 3 种干扰的时频特征差异较大，用单一的方法难以同时抑制。故而，针对不同类型的干扰，需要采用不同的方法。当前消除白噪声较有效的是小波/多小波滤波^[5,6]，抑制窄带效果较好的是 FFT 滤波^[7]和自适应滤波^[8]，而剔除脉冲型干扰可行的方法是神经网络滤波^[9]。结合这几种技术，可以有效地从采样数据中检测出局放信号。相应的局放数据预处理过程见图 4。

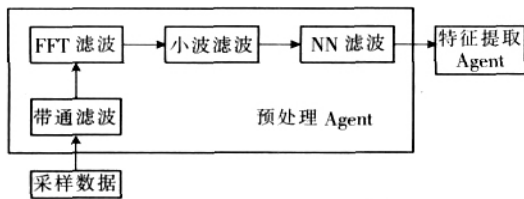


图 4 预处理层 Agent 的交互过程

(2) 数据层 Agent

数据层主要用于提取局放的若干特征参数。局放的特征参数大致可以分为统计特征参数和相位分布特征参数。统计特征参数由局放的时域信号直接提取得到，而相位分布特征参数则是由局放基于相位分布的数据得到。

笔者提取的统计特征参数有 10 种，分别为窄带信号、提取脉冲的阈值、最大放电量、平均放电量、最大放电量 95%、平均放电量 95%、平均放电电流、均方率、NQN 和平均放电次数。而提取的指纹特征参数有 26 种，通过两次相位平移(120 和 240)，最后得到的参数有 78 个，参数的类型与局放测试仪 TE571 的相同。

相应地，在这一层，设置两个具体的 Agent，用

于提取统计特征参数的 Agent 和用于提取指纹参数的 Agent，见图 3。

(3) 解释层 Agent

解释层主要用于将抽象的局放特征参数转化成初步有意义的信息。局放数据的解释是一个复杂的问题，需要结合设备的专业知识和各种智能诊断技术。多年的研究经验显示，在当前的条件下，采用单一的方法是不可能自动完成局放的诊断任务，需要采用多种技术形成一个混合诊断系统。而 Multi-Agent 结构一个很大的优点就是能支持多种解释技术。

统计参数通常用于描绘局放的发展趋势，评估局放的严重程度，而相位分布参数则作为指纹进行局放类型的识别。在该文中，局放的指纹参数用于进行相关性分析和聚类分析，推断局放类型的稳定性。

局放的解释主要是通过 4 个 Agent 来实现，分别是模糊评估 Agent、趋势分析 Agent、指纹相似性分析 Agent 和聚类分析。

(4) 确证层 Agent

确证层主要用于综合各个解释层 Agent 的输出，形成一个总体的结论。确证层应用解释层 Agent 提供的置信度，决定总体诊断和置信度。此外，确证 Agent 还结合其他监测技术的结果，对诊断结果进行评估，判断是设备的问题还是监测系统自身的问题。这一层只设置一个诊断 Agent，见图 3。

由图 3 可以看到，数据最初由数据监测器发送到分析系统。然后，每个解释 Agent 将得到的结论发送给确证 Agent。最后，确证 Agent 利用自身的知识及所有可能的信息去分析得出最终的结论。

正是由于有确证这个特别的推理层，通过简单地添加 Agent 和重新配置确证 Agent，可以及时采用最新的解释技术，或对已有的技术进行更新。

(5) 信息层 Agent

信息层主要用于和相关运行人员进行交互，提供有意义的信息，此外，运行人员也可以通过信息层修改系统的运行机制。在文中，信息层向相关人员提供最后的诊断结论，并给出相关的维护建议。

诊断结论包括正常(绝缘良好)、注意(注意观察)、警告(可安排辅助实验和维修)、严重(尽快停机)4 个级别，结论中还含有相应的置信因子，置信因子表示结论的可信程度，置信因子越大，表示结论越可信。维护建议包括短期建议和长期建议。

信息层只包含一个工程辅助 Agent，见图 3。信息层也是系统具备扩展性的重要组成部分，通过对 COMMAS 总体结构适当的调整，可以监测多台设备乃至多个电厂。

2.3 监测系统知识本体的设计

知识本体是 Multi-Agent 系统一个很重要的组

成部分,因为它支撑了 Agent 之间的通信,此外,它也是系统可以进行扩展的基础。

知识本体是系统词汇,其中定义了概念及其相互之间的关系,为所设计的发电机局放监测系统的知识本体,见图 5。它可以视为一个事实类层次,低层次的事实会继承高层次事实的属性,如图 5 中的局放特征向量事实会继承发电机数据事实的属性,局部放电事实会继承发电机数据事实的属性,放电监测总结事实继承局部放电事实的属性。这样的结构可以确保局放数据与发电机之间的一一对应,而且能确保数据的完整性。除了继承高层次事实的属性,每类事实都有其独特的属性,如放电特征向量事实包含特征向量和特征向量 ID 两个属性,在继承发电机数据属性的情况下,每一个存入数据库的放电特征向量最后都会包含发电机名称、电厂和采样时间信息,可以通过特征向量 ID 进行访问。同理,对每一个放电监测总结事实,它除了包含诊断结论和维护建议,还附带有关放电严重程度和类型稳定性信息。

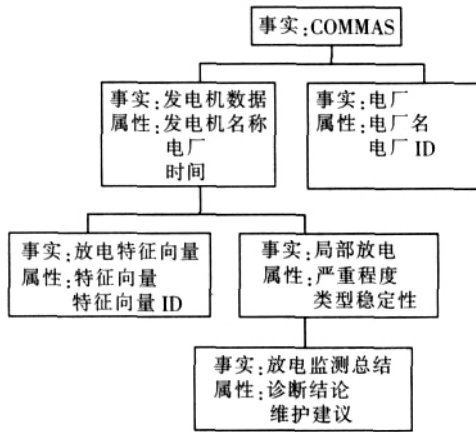


图 5 诊断系统的知识本体

2.4 Agent 服务及交互的定义

为了便于 Agent 之间的交互,需要定义单个 Agent 的功能(服务)。Agent 提供的服务在文中分为 9 种:①数据源;②预处理;③时域特征统计;④相域特征统计;⑤趋势分析;⑥指纹分析;⑦评估;⑧诊断确证;⑨诊断显示。

每个 Agent 都提供某种形式的服务,通过注册相应的服务,其他的 Agent 能搜索到这些服务,并找到相应的 Agent。

为了具备可扩展性,系统采用标准的 Agent 协定。Agent 间的通信只通过少数的几种消息来处理,如 subscribe、query、inform 和 confirm。其中,subscribe 和 query 分别用于 Agent 信息请求和查询,inform 则用于响应这两种操作,当一次活动完成时用 confirm 消息来确认。

COMMAS 由 Nameserver 和 Facilitator 这两个系统 Agent 提供支持。其中,Nameserver 管理所有 Agent 的网络地址,Facilitator 记录和管理所有 Agent

提供的服务。当一个 Agent 启动时,会自动向 Nameserver 注册,然后 Facilitator 从 Nameserver 获得那个 Agent 的地址,查询该 Agent 提供的服务。图 6 为指纹相似分析 Agent 的注册过程。每个 Agent 在启动时都会初始化一个类似的过程。

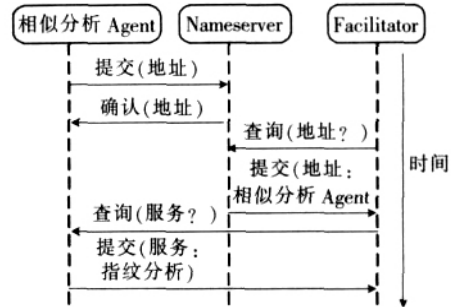


图 6 指纹相似分析 Agent 的注册过程

当 Agent 运行时,它会找到每个能够向它提供需求信息的 Agent,并发送正确的请求。图 7 为指纹相似分析 Agent 寻找相位分布特征提取 Agent,并发送请求的过程。

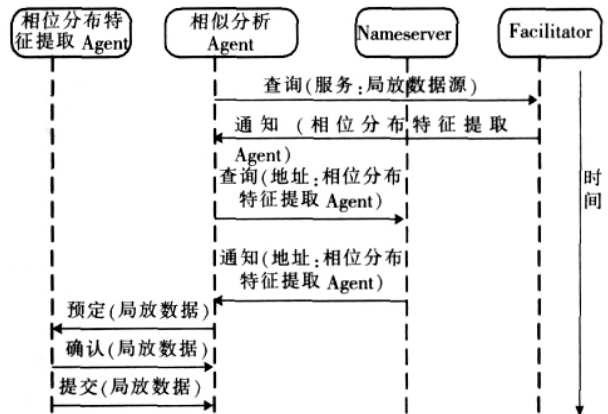


图 7 指纹相似分析 Agent 与数据源的连接

通过定义 Agent 的服务及交互,可以很方便地对系统进行增加、删除和更新,确保使用最新的技术。

3 结语

笔者设计了发电机局放在线监测 Multi-Agent 系统。相比其他的局放在线监测系统,Multi-Agent 系统具有如下的特点:①分布式计算,能够实时处理大量的监测数据,且能避免严重的通信问题;②结构灵活,可以进行扩展,增加新的监测系统或新的传感器;③组成的各个 Agent 可以单独进行更新,确保使用最新的技术。

参考文献:

[1] MCARTHUR S D J, STRACHAN S M, JAHN G. The Design of a Multi-Agent Transformer Condition Monitoring System[J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2004, 19(4): 1 845-1 852. (下转第 19 页)

- [3] 丁立健, 李成榕. 真空中绝缘子的沿面闪络现象 [J]. 高电压技术, 1999, 25(2): 53-57.
- [4] 张冠军, 杨敏中, 严璋等. 采用光学方法研究陶瓷绝缘材料的沿面闪络特性[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(8): 27-30, 36.
- [5] 汤俊萍, 邱爱慈, 陈维青等. 真空中聚乙烯膜在纳秒脉冲电压下的沿面闪络特性[J]. 强激光与粒子束, 2003, 15(10): 1 019-1 022.
- [6] 雷杨俊, 肖定全. 真空中氧化铝陶瓷表面耐压试验研究[J]. 绝缘材料, 2004, 37(3): 29-35.
- [7] GAO W, SUN G S, PAN Y. et al. Dependence of Flashover Voltage on Gas Pressure in Vacuum [C]// The 12th Asian Conf. on Electrical Discharge (ACED), Shenzhen, China, 2004: 385-388.
- [8] ABDEL-SALAM M, STANEK E K. Optimizing Field Stress on High-voltage Insulators [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1987, 22(1): 47-56.
- [9] ALLEN N L, MIKROPOULOS P N. Profile Effect on Surface Flashover in a Uniform Field [C]// High Voltage Engineering Symposium 1999, London, 1999(1): 216-219.
- [10] EGIZIANO L, SPAGNUOLO G, TUCCI V. Profile Optimization for an HV Insulator in Vacuum [C]// Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Quebec, 1996: 357-360.
- [11] PILLAI A S, HACKAM R. Optimal Electrode-solid Insulator Geometry with Accumulated Surface Charges [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1984, 19(4): 321-331.
- [12] NADOLNY Z, ZIOMEK W. Field Stress Control for Spacer in Vacuum Using Varied Geometry of Triple Junction [C]// XVIIth International Symposium on Discharges and Electrical Insulation in Vacuum, Berkeley, 1996: 527-531.
- [13] SAMPAYAN S E, VITELLO P A. Multilayer High Gradient Insulator Technology [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(3): 334-339.
- [14] KATSUMI KATO, MUNEAKI KURIMOTO, HIDEKI SHUMIYA, et al. Application of Functionally Graded Material for Solid Insulator in Gaseous Insulation System [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 362-372.
- [15] 张冠军, 赵文彬, 郑楠等. 真空中固体绝缘沿面闪络现象的研究进展[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 30-35
- [16] MILTO O. Pulsed Flashover of Insulator in Vacuum [J]. IEEE Trans. on Electrical Insulation, 1972, EI-7(1): 9-15.

(上接第 10 页)

- 结合神经网络诊断变压器故障 [J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 4-8.
- [3] 章剑光. 变电设备状态检修应用研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004.
- [4] 徐文, 王大忠, 周泽群, 等. 结合遗传算法的人工神经网络在电力变压器故障诊断中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 109-112.
- [5] 贾嵘, 蔡振华, 康睿. 基于最小二乘支持向量机的系统边际电价预测[J]. 高电压技术, 2006, 32(11): 145-148.
- [6] 王少芳, 蔡金铨, 刘庆珍. 基于改进 GA-BP 混合算法的电力变压器故障诊断[J]. 电网技术, 2004, 28(4): 30-33.
- [7] 王少芳, 蔡金铨. GA-BP 算法在变压器色谱诊断中的应用[J]. 高电压技术, 2003, 29(7): 3-6.
- [8] SHI Yu-hui, EBERHART R. A Modified Particle Swarm Optimizer [C]// Proc. IEEE Int Conf. on Evolutionary Computation Anchorage: IEEE, 1998: 69-73.
- [9] EBERHART R, KENNEDY J. A New Optimizer Using Particle Swarm Theory [C]// Proc. 6th Int Symposium on Micro Machine Human Science, Nagoya, 1995: 39-43.
- [10] SUGANTHAN P N. Particle Swarm Optimizer with Neighborhood Operator [R]. Proceedings of Congress on Evolutionary Computation, 1999.
- [11] 李天云, 程思勇, 董建东, 等. 基于 Elman 神经网络的油浸式电力变压器故障诊断[J]. 中国电力, 2006, 39(11): 55-57.
- [12] 曹永刚, 周玲, 丁晓群, 等. 基于概率神经网络的电力变压器故障诊断[J]. 继电器, 2006, 34(3): 9-11.
- [13] 贾嵘, 徐其惠, 李辉, 等. 最小二乘支持向量机多分类法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2007, 33(6): 110-113.

(上接第 14 页)

- [2] HOSSACK J A, MENAL J, MCARTHUR S D J, et al. A Multi-Agent Architecture for Protection Engineering Diagnostic Assistance [J]. IEEE Trans. on Power Systems, 2003, 18(2): 639-647.
- [3] MCARTHUR S D J, CATTERSON V M. Multi-Agent Systems for Condition Monitoring [M]. United States: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2005.
- [4] MANGINA E E, MCARTHUR S D J, McDONALD J R. COMMAS (COndition Monitoring Multi-Agent System) [J]. Autonomous Agents and Multi-Agent Systems, 2001, 4(3): 279-282.
- [5] 徐剑, 黄成军, 金浩, 等. 基于小波集合的局部放电信息提取算法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 36-40.
- [6] 徐冰雁, 黄成军, 钱勇, 等. 多小波相邻系数法在局部放电去噪中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(15): 61-64, 70.
- [7] 徐剑, 黄成军. 局部放电窄带干扰抑制中改进快速傅里叶变换频域阈值算法的研究[J]. 电网技术, 2004, 28(13): 80-83.
- [8] 黄成军, 郁惟镛. 基于小波分解的自适应滤波算法在抑制局部放电窄带周期干扰中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 107-111.
- [9] 邵震宇, 黄成军, 赵亚奎, 等. 用 PSO 算法训练神经网络抑制发电机局放随机脉冲干扰 [J]. 电力系统自动化, 2005, 29(11): 49-52.