

引入事例推理的牵引变电所故障分析专家系统

刘凤, 李群湛

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 传统的电气化铁道牵引变电站故障分析专家系统多采用基于规则推理 (BRB) 的方法, 获取知识困难, 推理速度较慢, 自学习能力较差, 很难适应铁路牵引网发展的需求。文中介绍了引入事例推理的方法, 将事例库分为知识库、一般事例库以及特殊事例库, 使系统故障分析更加快速可靠, 动作评价准确, 克服了传统专家系统获取描述准确知识困难的瓶颈, 提高了自学习能力。

关键词: 故障分析专家系统; 事例推理; 规则推理; 牵引变电所

中图分类号: TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897 (2006) 10-0077-04

0 引言

重载高速的电力牵引是铁路现代化的发展方向, 对供电可靠性和安全性的要求越来越高。供电系统发生故障时会产生大量的报警信号, 调度员需要在短时间内对这些信号进行分析判断, 并采取措施确保供电的可靠性。目前, 电力系统研究者提出了专家系统、人工神经网络、模拟进化优化、基于 Tabu 搜索技术的方法和概率诊断方法^[1,3,5]等。其中, 专家系统具有的类似于人类专家推理和判断能力, 比较适合牵引变电所的故障诊断分析, 能对提高铁路供电系统故障处理过程的自动化、远动化及运行管理智能化起关键作用。

目前, 大多数智能诊断系统是基于规则推理的专家系统, RBR 系统将领域专家的经验知识抽象为 if-then 形式的规则, 利用这些规则进行推理判断。其优点是知识表达形式简单、直观, 推理过程易于形式化, 因而被广泛采用。但是规则确定需要领域专家和知识工程师反复交换意见后才能形成。即便如此, 由此获取的知识仍然是不全面的, 甚至是不准确的, 尤其这些静态的知识往往不能适应领域知识不断发展的要求。RBR 系统的学习能力比较差, 作者曾为四川某牵引变电所设计的基于规则的故障分析专家系统, 就是根据开关和继电保护装置的动作信息确定故障设备。在适用于其他变电所时, 需进入规则库内部改变其规则库和数据库。可移植性差, 学习功能不强。而 CBR 系统可以解决以上缺憾, 它是通过访问事例库中过去相似事例的处理经验而获得当前问题解决方案的一种新的推理模式, 在 CBR 系统中, 知识是以事例的形式存储的, 不存在知识获

取困难的难题。相比较而言, 基于事例的推理系统, 对知识、经验及信息的完备程度要求要低于基于规则的专家系统, 且推理效率较高, 但也存在缺点, 检索出的相似事例不是满意结果, 或者在相似事例不完全符合新要求时, 缺乏好的事例改写机制。

因此, 本文根据两者的优缺点, 提出引入 CBR 技术的牵引变电所故障分析专家系统。

1 系统结构

CBR 牵引变电所故障分析专家系统是以 CBR 为主, RBR 为辅的系统。它由两大模块构成, 第一层是基于事例的推理机, 它包含一个事例库。系统根据问题的详细说明, 由基于实例的推理机从事例库中找出一组相似的事例, 并且按相似度排序, 由最近邻法决定一个最佳事例, 如果匹配度太低, 则由基于规则的推理机、知识库进行推理, 从而修改目标事例中相应的内容来满足要求。

这两大模块由以下几个部分构成, 其各自实现的功能如下: 变电所的微机故障录波装置负责从监测点收集电压、电流信息以及保护继电器、断路器的动作信息, 记录在录波文件中, 作为原始数据。故障信息预处理模块进行信息的分类和过滤, 提炼有效的故障相关信息, 同时提供故障数据的可视化综合分析手段。故障信息进入 CBR 推理系统中, 进行特征分析和事例匹配, 用最近邻匹配函数^[9] (Nearest-Neighbor, 简称 NN) 进行检索, 计算综合相似度 NN:

$$NN(n, p_k) = \frac{\sum_{i=1}^m w_i \text{sim}(a_i^n, a_i^{p_k})}{\sum_{i=1}^m w_i}$$

其中: a_i^n 与 a_i^{pk} 分别表达对应新旧事例的第 i 个特征值, w_i 是表示第 i 个特征的权值, $sim(a_i^n, a_i^{pk})$ 是一个用于确定某个特征两两相似程度的函数、规则或启发式知识。

CBR系统推理过程中,若匹配度高,则直接输出结果,并将分析结果用报表的方式呈现给调度员。若匹配度太低,则进入RBR推理系统,利用RBR知识库中的规则进行推理,输出结果,并将该故障信息以及推理结果存入事例库,作为一个CBR系统中一个新的事例,从而提高了系统的稳定性和运行速度。

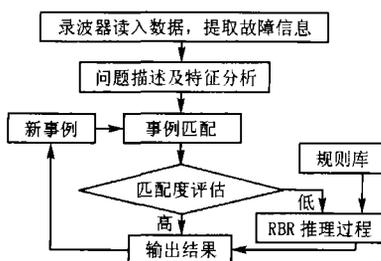


图1 引入CBR的系统结构图

Fig 1 System structure based on CBR

2 事例库

事例库包括知识库、一般事例库以及特殊事例库。知识库由网络拓扑结构、设备属性组成。不同的牵引变电站根据各自不同的接线生成不同的知识库。一般事例库由继电保护动作规则、电流电压整定规则组成,包含变电站常规的各种主变保护动作事例、馈线保护动作事例以及电容保护动作事例等。例如低压启动的相过电流保护事例写成表1所示:

表1 相低压过电流保护事例

Tab 1 Case of low-voltage over-current protection

事例序号	112
事例名称	低压启动的相过电流保护
事例前件	U_a, U_{a0} 且 I_a, I_{a0} ·将该保护的對象状态设置为“动作” ·在事例库中查找该保护所对应的跳闸断路器列表,并将列表中所有断路器对象的状态置位
事例后件	·将保护及其跳闸断路器的动作事件分别加入推理结果的相应列表中

特殊事例库包含牵引变电所以往运行过程中出现的特殊事例。如变压器重瓦斯保护、主变过热保护、主变压力保护、油位保护等。这些继电保护,其动作原理不是根据电气量的关系来构成的,那么

这些保护的动作为就不能够用录波数据中的电气量采样值来校验。在进行故障判断和推理时,遇到非电量保护发生动作,直接进入事例推理。提取故障特征值,匹配事例库的事例。

并且, CBR系统在运行时可不断添加新事例以增强判断功能。添加规则为:在事例匹配评估低,即事例推理失败,进入RBR推理之后,根据RBR推理得出判断结果,经过专家检验或者调度员现场确认之后,如果认为其判断正确,则将该推理结果添加到事例库中。

3 引入事例推理开发的牵引变电所故障分析专家系统

本文以四川某变电所建立分析实例。如图2所示。该变电所为典型的中间式三相牵引变电所。在高压侧采用了简单双T型接线,设有两台三相牵引变压器,其绕组接线方式均为YN-d11,正常运行时一主一备,互为备用,低压侧绕组的c相接地并与钢轨连接。在27.5kV侧采用了不分段的单母线接线。牵引网为复线牵引网,每个供电臂都分上行和下行馈线。在低压侧的相和相均设有并联补偿电容器。

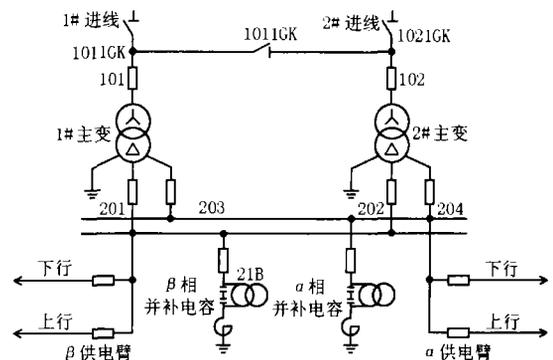


图2 四川某变电所的接线示意图

Fig 2 Connection of one substation in Sichuan

本变电站中,故障录波器采集和监测的信息包括模拟量和开关量。模拟量由电压互感器和电流互感器的二次侧接入,包括主变压器高压侧的三相电压和三相电流、低压侧的母线电压和馈线电流以及补偿电容器电流等14路信号。开关量则主要引入牵引变电所内安装的各种保护出口继电器的接点信号和各个断路器位置接点信号共61路。事例库中共包含47条基本故障事例和4条特殊事例。选取50余种故障事例进行系统测试,该专家系统在继电保护装置和开关正常工作、误动、拒动,重瓦斯保护

等情况下均能得到正确结果。

4 典型故障情况及开关动作评价

本专家系统采用 Visual Prolog6.0 开发完成, Visual Prolog 是基于 Prolog 语言的可视化集成开发环境, 是国际上研究和开发智能化应用的主流工具之一, 具有模式匹配、递归、对象机制、事实数据库和谓词库等强大功能, 非常适合于专家系统、规划和其他 AI 的求解^[6]。

以下对变电所的 1 号变压器的典型故障情况相低压启动过电流保护进行分析。

现场实际情况为变压器 相发生单相接地短路故障, 低压启动过电流保护应该动作, 相应的断路器 d203 跳闸, 但由于某些原因, 实际的变压器 相低压启动过电流保护拒绝动作, 而高压侧低压启动过电流保护动作, 相应的断路器 d101, d201, d203 跳闸。专家系统推理工作情况如下:

1) 故障录波器读入高、低压侧电压、电流等模拟量信号, 101、210、203 断路器动作数字信号, 主变差动保护 cd_p、主变 27.5 kV 相低压过流保护 a_dy_gl_p 等保护动作信号

```
equipment(11): -
    transformer(1),
    write("Se = ,Ue = , Ie = "),
    list1 = [101, 201, 203],
    list2 = [cd_p, a_dy_gl_p, b_dy_gl_p, dy_gl_3p, g_p],
    .....
    list1 = [1, 1, 1]
    list2 = [0, 0, 0, 1, 0]
```

2) 进入事例库推理, 采用问题字段匹配的方法查找方案组;

```
Case code(12): -
    it_is(a_dy_gl_p),
    xvaction(da_u),
    xaction(da_u),
    asserta(breaker(203)).
```

3) 推理继电保护、断路器动作, 在断路器动作列表中, 1 表示跳闸, 0 表示不动作, 在保护列表 list2 中, 1 表示保护动作出口, 0 表示无保护动作出口;

```
list1_case = [0, 0, 1]
list2_case = [0, 1, 0, 0, 0]
```

4) 评价继电保护的動作行为, 将第三步中事例推理得到动作列表与第一步录波器读到的实际动作列表相减, 得到继电保护、断路器动作评价序列, 其中, 1 表示拒动, 0 表示正确动作, -1 表示误动;

```
evaluation([], [], []).
evaluation([M|T], [N|P], [X|K]): -
    X = M - N,
    evaluation(T, P, K).
write("0 - - right_action 1 - - resist_action - 1 -
- error_action").
.....
list1_ev = [- 1, - 1, 0]
list2_ev = [0, 1, 0, - 1, 0]
```

通过检验可以看出本专家系统对于牵引变电所主要故障类型具有较强的识别能力, 并且可以 CBR 系统的学习的功能来不断丰富专家系统的故障模型数据库, 使其识别故障的能力不断的增强。

5 结论

基于故障录波器的采集数据, 采用 Visual Prolog 可视化编程, 引入 CBR 开发研究的牵引变电所故障分析专家系统, 能够向工作人员展示有关故障的全部信息, 对故障参数进行分析和计算, 对所发生的故障进行推理和判断, 正确评价继电保护的動作行为。通过现场运行检验, 它可以大大减轻变电所运行人员的劳动强度, 提高故障查找和后果评价工作的自动化和智能化水平。

参考文献:

- [1] 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): 35-37. 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): 35-37.
- [2] 倪志伟, YUN Yang, 杨善林, 等. 集成范例推理系统的研究 [J]. 系统仿真学报, 2004, 16(4): 804-806. NI Zhi-wei, YUN Yang, YANG Shan-lin, et al Research on Integrated Case-based Reasoning System [J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(4): 804-806.
- [3] 顾雪平, 张文勤, 高曙, 等. 基于神经网络和元件关联分析的电网故障诊断 [J]. 华北电力大学学报, 1999, 26(2): 12-17. GU Xue-ping, ZHANG Wen-qin, GAO Shu, et al An Approach Integrating Neural Networks with Topology Analysis of Electric Power Networks for Fault Diagnosis [J]. Journal of North China Electric Power University, 1999, 26(2): 12-17.
- [4] 王文君, 张沛超, 郁惟镛. 基于事例推理的继电保护运行管理专家系统 [J]. 继电器, 2001, 29(12): 18-20. WANG Wen-jun, ZHANG Pei-chao, YU Wei-yong The

Protection Operation Management Expert System Based on CBR [J]. Relay, 2001, 29 (12): 18-20.

- [5] 张琦,韩祯祥,文福栓. 一种基于粗糙集理论的电力系统故障诊断和警报处理新方法 [J]. 中国电力, 1998, 31 (4): 32-38

ZHANG Qi, HAN Zhen-xiang, WEN Fu-shuan A New Approach for Fault Diagnosis and Alarm Processing in Power System Based on Rough Set Theory [J]. Electric Power, 1998, 31 (4): 32-38

- [6] 雷英杰,张雷,等. Visual Prolog语言教程 [M]. 西安: 陕西科学技术出版社, 2002

LEI Ying-jie, ZHANG Lei, et al Visual Prolog Language Tutorial [M]. Xi an: Shaanxi Science and Technology

Publishing House, 2002

收稿日期: 2005-12-05; 修回日期: 2006-01-17

作者简介:

刘 凤 (1982 -),女,硕士,研究方向为牵引变电所故障故障分析和智能故障信息处理; E-mail: phoenix820217@126.com

李群湛 (1957 -),男,工学博士,教授,博士生导师,主要从事电力系统与牵引供电系统的综合补偿及优化设计,负荷及行为过程仿真,三相不对称非线性负荷的谐波分布及对策等方面的教学与科研工作。

Fault analysis expert system of transformer substation based on case-based reasoning

LU Feng, LI Qun-zhan

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

Abstract: The rule-based traditional fault analysis expert systems are mostly adopted in transformer substation. But their knowledge acquiring and self-learning ability is weak, the speed of reasoning is slow. It is difficult for them to meet the need of railway traction net development. A new method based on case-based reasoning is proposed. The case database is composed of three parts: knowledge database, common case database and special case database. The system can analyze the fault accurately and quickly, overcome the bottleneck of the traditional expert systems which obtain and describe the knowledge difficultly, at the same time, the self-learning ability is greatly improved.

Key words: expert system of fault analysis; case-based reasoning (CBR); rule-based reasoning (RBR); transformer substation of the railway

(上接第 59 页 continued from page 59)

收稿日期: 2005-10-25; 修回日期: 2005-12-30

作者简介:

付 蓉 (1974 -),女,博士,研究方向为市场环境下电力系统规划; Email: furong@njupt.edu.cn

魏 萍 (1973 -),女,博士,研究方向为电力市场运行,配网自动化的研究和教学工作;

万秋兰 (1950 -),女,博士,教授,研究领域为电力系统运行与控制,电力市场等。

Congestion index based multi-stage transmission expansion under market environment

FU Rong¹, WEI Ping², WAN Qiu-lan², LI Yang², TANG Guo-qing²

(1. Institute of Automation, Nanjing University of Posts & Telecommunications, Nanjing 210003, China;

2. Department of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: In a competitive power market, it is important to expand transmission system in delivering power from generators to loads, relieving the congestion of transmission system and providing a fair environment to all market participants. In this paper, a new congestion index is used to evaluate the reliability of transmission planning system. Then the congestion index constrained model for the multi-stage transmission system expansion planning is constructed, and the method solves for the optimal strategy using an improved niche genetic algorithm. Finally, test results on the IEEE 24-bus example system show that the proposed method is very suitable and effective for solving the multi-stage transmission expansion planning problem under power market environment.

Key words: congestion index; congestion cost; improved niche genetic algorithm; multi-stage transmission expansion planning