

基于模糊推理的分布式电力系统故障诊断专家系统

周 明¹, 任建文¹, 李庚银¹, 徐开理²

(1. 华北电力大学电力系, 河北保定 071003; 2. Wyoming 大学, 美国)

摘要: 针对电力系统故障诊断问题存在的大量不确定性, 提出了将模糊集和模糊推理方法结合专家系统进行故障诊断的新方案。同时, 尝试将分布式问题求解方法用于电力系统故障诊断问题, 开发了基于模糊推理的分布式电力系统故障诊断专家系统。为方便用户使用, 开发了图形建模和模糊知识学习平台, 以及故障信息管理系统。通过在某地区电网的测试表明, 所提方案具有准确的诊断结果和很好的实用性。

关键词: 故障诊断; 模糊推理; 专家系统; 分布式问题求解; 故障信息管理

中图分类号: TM 711; TP 18

0 引言

电力系统故障诊断是近年来十分活跃的研究课题之一, 人们对此进行了大量研究^[1~9], 取得了许多有价值的理论研究成果, 提出了多种解决方案, 如采用专家系统方法^[2,4,6,8]和神经网络方法^[4]等。由于实际运行中用于故障诊断的断路器和保护动作信息存在着大量的不确定性, 近年来有学者将模糊推理方法应用于电力系统故障诊断^[3,5~7,9]。但以前的研究大多集中在理论探讨上, 在解决电力系统运行过程中出现的实际问题方面进展不大。现代电网互联规模和运行复杂性越来越大, 运行越来越接近极限, 一旦发生故障, 造成的损失也较以往增大, 因此对运行人员迅速准确处理事故的能力的要求进一步提高。电力系统故障自动诊断系统不仅可以成为运行人员在处理事故时的得力助手, 还可成为运行人员培训的有力工具。

本文在前期开发的面向对象的电力系统故障诊断专家系统^[8]的基础上, 借鉴其他研究成果^[3,5~7], 增加了基于模糊集的报警信息处理, 不但考虑了开关和保护动作的不确定性, 还将故障时电压、电流不同于正常运行时的特征信息用模糊集表示, 利用模糊推理来提高诊断结果的准确性和可用性; 同时开发了模糊集学习平台, 以缓解专家系统知识获取的难题; 利用网络通信技术和分层分布式问题求解方法, 解决电力系统信息分层和应用用于实际电力系统故障诊断时出现的问题, 提出了两种分层分布式故障诊断问题求解方案, 并就其中一种方法进行了深

入探讨和测试。现场测试表明: 本文提出的将模糊集及模糊推理结合专家系统方法用于电力系统故障诊断问题是有实效的, 提出的分层求解方法符合电力系统实际情况, 使故障诊断问题向实际应用迈进了一步。

1 基于模糊集的电力系统故障诊断推理模型

文献^[7]对基于模糊集的电力系统故障诊断问题做了较好的理论研究, 提出用模糊集处理报警信息的不确定性, 且给出了衡量诊断结果合理性的标准。但文献^[7]的研究只将断路器和保护动作信息作为故障诊断的出发点。事实上, 故障时电流电压均发生明显的变化, 这些变化特征对故障诊断很有用, 尤其在变电站的故障信息分析上效果非常明显。本文在前期开发的面向对象的电力系统故障诊断专家系统的基础上, 扩充了文献^[7]的模糊集的范围, 充分考虑了故障时电流电压的变化特征, 并将其也用模糊集表示, 全面利用故障信息进行诊断推理。

电力系统在以下这些方面都存在不确定性: 报警信息的正确性、设备运行及通信通道的可靠性、遥测遥信配置的冗余度等。考虑到这些不确定性, 电力系统故障诊断问题可以用带有模糊关系的 4 元集合组表示: $\{D, M, \mu, M^+\}$ ^[7,9], 其中每个元素的含义如下:

$D = \{d_1, d_2, \dots, d_n\}$, 为系统所有 n 个元件的集合, 包括线路、变压器、母线等。 D 在一定程度上代表了系统的规模, 与实际系统设备数据库对应, 是故障诊断结果集的最大覆盖, 也就是说, 故障诊断结果一定是 D 的一个子集。

$M = \{m_1, m_2, \dots, m_k\}$, 为系统 k 个报警的集合。断路器和保护动作信息以及相关遥测变化量都是

M 中的元素。精确推理时,针对遥信信息, M 中的元素要么取 1(如果相应的报警出现),要么取 0(相应的报警不出现);本文将相关的遥测量扩充进 M ,由于文献[7]、文献[9]未考虑遥测报警信息,为了与文献[7]、文献[9]一致,遥测量在 M 中一律取 1(借鉴标么值的概念,1 代表额定运行值)。

考虑前述不确定性因素的影响, μ_c 代表元件故障与相应报警信息出现的模糊化的因果关系。 μ_c 表示为 $n \times k$ 的矩阵形式。 μ_c 中的元素 μ_{cij} 代表 d_i 故障可直接引起报警 m_j 出现的概率。

M^+ 是实际报警模糊集,可以用下列模糊集表达式表示:

$$M^+ = \sum_{i=1}^L \frac{\mu(m_i)}{m_i} \quad L \leq k \quad (1)$$

式中 $\mu(m_i) > 0$, 表示实际收到报警信号的可靠性或者应该收到但未收到的报警信号出现的可能性。

$\mu(m_i)$ 的大小与实际系统的断路器、保护等设备有关的测量设备的运行可靠性,以及通信通道的配置有关。如果设备运行的可靠性高,则相应的 $\mu(m_i)$ 取较大值,否则取较小值。遥测量报警更适合用此模糊集表示。例如,某种故障引起电流增大,或者电压降低,这种“增大”、“降低”原本就是一种模糊的概念,用模糊集表示遥测量偏离额定值的程度非常适合。 $\mu(m_i)$ 具体确定方法可由现场专家参与,通过多次试验给出。

电力系统故障诊断问题即为:在满足 μ_c 的情况下,寻找能合理解释 M^+ 的设备集 D^+ 。能合理解释 M^+ 的解可能不只 1 个(假设有 J 个),这就需要有一个评判指标。本文采用“最合理解释度”指标。所谓最合理解释度是指:先计算解集 D_j^+ ($j=1,2,\dots,J$) 对 M^+ 的合理解释度 $E(D_j^+)$, 然后对 $E(D_j^+)$ 进行排序,其中 $E(D_j^+)$ 最大的解 $D_{j_{\text{best}}}^+$ 认为是最合理解释 M^+ 的故障设备集。 $E(D_j^+)$ 可用下列方法计算:

$$E(D_j^+) = \sum_{i=1}^{n_d} \frac{A_i - B_i}{n_d} \quad (2)$$

式中 $A_i = V(\mu(m_j) \vee \mu_{cij})$ 反映了 D_j^+ 中某一元件 d_i 故障对 M^+ 中出现的报警信息的解释程度; $B_i = \vee \mu_{cij}$ 反映了 D_j^+ 中某一元件 d_i 故障应该出现但没有在 M^+ 中出现的报警信息的解释程度; n_d 是 D_j^+ 中故障元件的数目。

可见 $E(D_j^+)$ 反映了故障元件集 D_j^+ 解释 M^+ 的合理程度。

从上述最合理解释度的描述中可以看出,确定 μ_c 是计算的前提,即代表元件故障与相应报警信息出现的模糊化的因果关系矩阵 μ_c 。确定 μ_c 中元素数

值的大小要考虑不同设备动作的可靠性,这点可以根据现场运行情况确定。如果认为断路器动作的可靠性比较高,则相应元素可以取较大数值;一些不直接反映元件故障的信息(例如后备保护动作信息)对应的 μ_{cij} 应取较小值。

2 分层分布式故障诊断问题求解方法

针对电力系统这样一个日趋复杂的大系统的故障诊断问题,过去的研究多采用单一的集中求解方法^[1,2,4~9],难以适应电力系统的实际情况。由于现场自动化水平、通信技术和设施的发展及分布不同,新建或改建的变电站具备很高的综合自动化功能,而一些旧变电站的自动化水平较低;有的变电站配有数字式故障录波装置,而有的则没有。用于故障诊断的信息是分散分布的,并不是所有的信息都集中到调度中心,这些实际情况制约了故障诊断问题的集中实现。现代通信和网络技术在电力系统中的应用日趋成熟,将分层分布式求解方法用于电力系统故障诊断问题已具备条件,并且会取得更好的使用效果。

分层分布式电力系统故障诊断问题求解方法是指:根据已知条件及分布情况,将电力系统故障诊断这样一个复杂问题分成相互关联的若干子问题,各个子问题相互独立又相互协调地进行求解。分层分布式求解方法用于电力系统故障诊断可以划分为两种模式:模式 1 是在变电站端不做分析处理,收集所有信息等待调度中心的查询,或者定时发送给调度中心;模式 2 是在变电站端配有智能故障分析功能,利用就地断路器、保护动作信息以及电流、电压变化特征进行详细的故障分析,将具体的分析结果上传到调度中心,协助调度端进行准确的故障诊断。模式 1 不能算是真正的分布式求解,对变电站端的要求较低,但对通信要求较高,特别是出现复杂故障时,有大量的信息涌入调度中心,给调度中心的分析处理带来压力。这种方式如果在信息通信满足要求的条件下,由于调度中心拥有整个系统的报警信息,分析诊断结果会更全面、准确。模式 2 在变电站端完成了大量的就地分析功能,可以充分利用当地的断路器、保护动作信息和故障录波信息,不但使详尽地进行故障信息分析成为可能,而且实现准确的故障定位也是可能的,适合当地自动化功能先进的变电站。这种方式使得在调度中心与变电站之间的信息交换量大大减少,更适合现场条件。本文根据模式 2 提出了基于模糊集的分层分布式电力系统故障诊断推理方法,具体实现步骤为:

a. 建立系统拓扑结构数据库,建立和完善模糊

规则库,形成 D, M, μ_c 。

b. 利用作者前期研究成果^[8]搜索出停电区域 $D_{ti} (i=1, 2, \dots, t)$ 。由于在网络拓扑结构表示中采用了指针描述设备之间的连接关系,所以停电区域的推理速度非常快。

c. 对停电区域 D_{ti} 分别建立其实际报警模糊集 M^+ , 应用前述模糊推理方法, 得到推理结果 D_{jbest}^+ 。

d. 对 D_{jbest}^+ 中涉及到的元件, 主动查询相关变电站的故障信息和分析结果, 综合得出具体的故障元件及故障原因, 以及收到的报警信息的真实度和可能遗漏的报警信息。

具体的推理流程如图 1 所示。

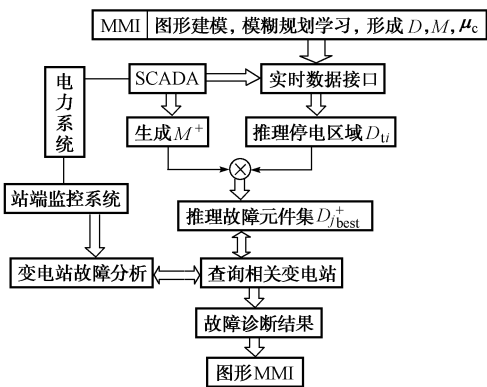


图 1 推理流程图

Fig. 1 The inferring flowchart

3 电力系统拓扑建模及模糊集学习平台

采用面向对象技术开发了图形建模, 在形成系统拓扑结构图的同时, 填写设备属性单, 拓扑分析进程自动完成网络拓扑结构分析, 建立设备之间的连接关系, 为故障分析时的网络搜索做好数据准备。故障诊断中要用到设备的继电保护配置信息, 而二次信息是设备建库和维护时工作量较大的一项工作。由于二次设备一致性很强, 即同一电压等级的同一类设备的保护配置一般相同。通过建立各个电压等级下不同类型设备的保护配置模板类, 具体设备通过建立模板类的实例来实现二次设备参数配置和数据库的建立, 这种方法大大提高了数据库建立和维护的效率。

在上述基于模糊集的诊断推理模型中, μ_c 各元素值的确定需要现场人员参与决策, 为此, 特别建立模糊集学习平台, 根据现场实际情况, 通过开放的配置平台, 自动调节 μ_c 中元素的值, 建立 μ_c 矩阵。

4 系统总体结构和功能

电力系统故障诊断系统是一个包括调度端的系

统故障诊断服务器(FDS)、故障信息管理系统(FIM)、变电站端故障信息分析系统(SFA)、系统建模及人机界面(MMI)和网络通信系统(NetCom)的分层分布式网络系统。图 2 表示了系统的总体结构。其中, MMI 采用面向对象技术开发了功能丰富的人机界面, 包括前面介绍的图形建模系统、模糊规则学习平台, 还有故障信息查询、浏览及打印界面、数据库管理界面等。FDS 在 MMI 建立的电力系统拓扑结构基础上, 利用实时 SCADA 库中的遥信、遥测信息, 采用模糊集及模糊推理的方法, 进行电力系统故障诊断。FDS 位于调度中心, 负责接收实时 SCADA 信息, 并与下级变电站通信, 查询变电站的故障分析信息。由于通信通道的限制, 现场很多有益的信息没有全部上传到调度中心, 比如对故障分析非常有益的故障录波信息等。SFA 借助于现场丰富的电流、电压变化信息以及保护、自动装置动作信息, 详细进行站端的故障分析, 并将分析结果主动送给调度中心或等待调度中心查询。NetCom 是整个故障诊断系统的联络神经, 根据系统设置和实际故障分析情况查询或接受变电站的信息, 采用 TCP/IP 协议, 利用 Winsock 编程实现网络通信, 实现局域网联网或通过自动拨号实现 Intranet 联网。FIM 综合管理全系统实时故障信息“快照”和一定时期的历史信息, 以备日后培训或其他部门查询分析使用。

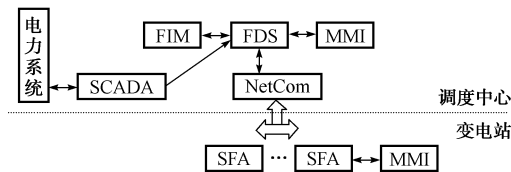


图 2 系统总体结构图

Fig. 2 Overall structure of the system

5 测试情况

利用本文开发的基于模糊推理的分布式电力系统故障诊断专家系统, 对某地区电网进行了实际测试。该地区电网有 220 kV 变电站 2 座, 110 kV 变电站 10 座。接入调度中心的遥测量 2 800 多个, 遥信量 1 400 多个。经过改造, 已有几座变电站配有先进的综合自动化系统和智能故障录波装置。

测试情况如下: 在调度端和有条件的变电站安装相关的诊断推理系统和通信系统之后, 调度中心能很快推理出停电区域, 变电站并行进行故障分析, 调度端主动查询变电站的故障分析结果, 汇总得出详细的故障元件, 报告可疑的报警信息和应该收到但未收到的报警信息。

测试结果表明: 由于采用了模糊集表示实际的报警信息, 并采用分层分布式推理方法, 故障诊断结

果更加准确,对调度运行人员快速处理故障提供了有力的帮助。全图形化显示操作界面和故障信息管理系统是运行管理、人员培训的得力工具。

6 结语

本文将模糊集及模糊推理用于描述电力系统信息的不确定性和故障诊断模型的不精确性,并结合电力系统信息分散分布的特点,将分布式问题求解方法成功地应用于解决电力系统故障诊断这样一个复杂问题;为方便用户使用,开发了图形建模和模糊知识学习平台以及故障信息管理系统。实际测试结果表明,该系统在故障诊断的准确性和有效性方面得到很大提高,并且在实用性方面得到了用户的肯定,具备了实时运行的条件。

参考文献

- 1 文福拴,韩祯祥(Wen Fushuan, Han Zhenxiang). 计及警报信息时间特性的故障诊断模型(A New Fault Diagnosis Model Capable of Dealing with the Temporal Information of Alarm Messages). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1999,23(17): 6~9
- 2 张学军,刘小冰,闫彩萍,等(Zhang Xuejun, Liu Xiaobing, Yan Caiping, et al). 基于正反向推理的电力系统故障诊断系统(Power System Fault Diagnosis Based on the Forward and Backward Reasoning). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1998,22(5):30~32
- 3 徐文,王大忠,周泽存,等(Xu Wen, Wang Dazhong, Zhou Zecun, et al). 模糊辨识在电力设备故障诊断中的应用(Application of Fuzzy Model Identification on Fault Diagnosis of Power Equipment). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),1996,20(3): 45~49
- 4 毕天姝,倪以信,杨奇逊(Bi Tianshu, Ni Yixin, Yang Qixun). 人工智能技术在输电网络故障诊断中的应用述评(An Evaluation of Artificial Intelligent Technologies for Fault Diagnosis in Power System). 电力系统自动化(Automation of Electric Power Systems),2000,24(2): 11~16
- 5 Chang C S, Chen J M, Srinivasan D, et al. Fuzzy Logic Approach in Power System Fault Section Identification. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 1997, 144(5): 406~414
- 6 Monsef H, Ranjbar A M, Jadid S. Fuzzy Rule-based Expert System for Power System Fault Diagnosis. IEE Proc—Gener, Transm and Distrib, 1997, 144(2): 186~192
- 7 韩祯祥,钱源平,文福拴(Han Zhenxiang, Qian Yuanping, Wen Fushuan). 基于模糊外展推理和 Tabu 搜索方法的电力系统故障诊断(Tabu Search Approach to Fault Diagnosis in Power Systems Using Fuzzy Abductive Inference). 清华大学学报(自然科学版)(Journal of Tsinghua University (Sci & Tech)),1999,39(3):56~60
- 8 Xu Kaili, Zhou Ming, Ren Jianwen. An Object-oriented Power System Fault Diagnosis Expert System. In: Proceedings of International Conference on Electrical Engineering. Hong Kong: 1999
- 9 Peng Y, Reggia J A. Abductive Inference Models for Diagnostic Problem-solving. New York: Springer-Verlag, 1990

周明,女,硕士,副教授,主要研究方向为人工智能、电网调度自动化等。

任建文,男,博士,副教授,主要研究方向为人工智能、电网调度自动化等。

李庚银,男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统谐波分析及治理、电网调度自动化、电力市场等。

DISTRIBUTED POWER SYSTEM FAULT DIAGNOSIS EXPERT SYSTEM BASED ON FUZZY INFERENCE

Zhou Ming¹, Ren Jianwen¹, Li Gengyin¹, Xu Kaili²

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

(2. University of Wyoming, USA)

Abstract: This paper proposes an approach to fault diagnosis combining fuzzy sets and fuzzy inference with expert system in the light of large number of uncertainties existing in power system fault diagnosis (PSFD). Moreover, an attempt applying the distributed problem solving method to PSFD is also made and a distributed PSFD expert system based on fuzzy inference is developed simultaneously. In particular, the practical test in a certain distribution power grid is carried out and the results have shown that the scheme presented in the paper is accurate and practical.

This project is supported by Foundation for University Key Teachers by the Ministry of Education (No. GG-470-10079-1001).

Keywords: fault diagnosis; fuzzy inference; expert system; distributed problem solving; fault information management