

一种考虑多层信息融合的电网故障诊断 辅助决策方法

刘毅, 高振兴, 郭创新, 彭明伟

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 分析了目前电网故障诊断的研究进展和问题, 将信息融合思想引入到故障诊断辅助决策过程中, 通过将信息融合中的数据、特征、决策概念对应于电网故障诊断中的具体对象, 构建了基于多层信息融合的电网故障诊断辅助决策架构。将概率 Petri 网的故障诊断方法和 WAMS 数据故障匹配方法结合用于辅助决策中的特征层融合, 并通过案例实践了多层信息融合电网故障诊断辅助决策的应用, 解决了电网故障诊断中的一些信息不完备的问题, 为未来智能电网的各种高级应用研究提供一种思路。

关键词: 故障诊断; 信息融合; 智能电网; 数据; 特征; 辅助决策; 故障匹配

An assistant decision-making for fault diagnosis based on multilayer information fusion

LIU Yi, GAO Zhen-xing, GUO Chuang-xin, PENG Ming-wei

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The current research progress and problems of grid fault diagnosis are analyzed, and the idea of information fusion is introduced to the process of assistant decision-making for fault diagnosis. Through matching the data, feature and decision-making concept of information fusion with the concrete subjects in grid fault diagnosis, an assistant decision-making structure of grid fault diagnosis is constructed based on multilayer information fusion. The combination of fault diagnosis method for Petri-net and fault matching method for WAMS data is applied to the feature level fusion of assistant decision-making, and the proposed assistant decision-making method is practiced, which solves the problem of incomplete information in grid fault diagnosis, and provides a reference for the research on advanced application of smart grid in the future.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50677062), New Century Excellent Talents in University (NCET-07-0745), Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (No.R107062) and National High-tech R&D Programe(No.2008AA05Z210).

Key words: fault diagnosis; data fusion; smart grid; data; characteristic; assistant decision-making; fault match

中图分类号: TM734 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0014-05

0 引言

电网故障诊断在电力系统日常运行中有着重要意义, 目前的主要研究方向集中在对保护开关动作信息的使用上^[1], 主要的诊断方法有专家系统^[2], 人工神经网络^[3]、基于优化模型的方法以及由于信息的不确定性和不完备而采取的基于模糊集、信息

理论和粗糙集的方法等^[4]。但是随着电力系统规模不断扩大和电网结构趋向复杂, 基于单一信息源的诊断方法已经难以满足智能电网下的故障诊断要求, 海量信息的不确定性和诊断过程中的知识组合爆炸暴露了原有方法在当前大规模电网故障诊断中的不足^[5]。

不过随着电网智能化的发展趋势, 电力系统调度自动化的水平也日益提高, 各种应用系统如 SCADA 系统、广域相量测量系统 (WAMS)、保护故障信息管理系统 (RPMS) 等都已经投入到电力系统运行中, 使得利用多信息源和分布式智能方法

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50677062); 新世纪优秀人才支持计划资助 (NCET-07-0745); 浙江省自然科学基金资助 (R107062); 国家 863 计划 (2008AA05Z210)

的故障诊断成为可能^[6]。电网故障诊断发展成为从电力企业各级控制中心的不同系统中来获取故障表征信息,并通过信息知识的融合,来为电网故障诊断提供辅助决策。

本文在综合考虑未来电网智能化发展方向的前提下,把信息融合思想引入到故障诊断辅助决策过程中,将信息融合中的数据、特征、决策概念对应于电网故障诊断中的具体对象,构建了基于多层信息融合的电网故障诊断辅助决策架构。通过实例,对典型系统进行了仿真测试,验证了多层信息融合方法应用于电网故障诊断辅助决策的可行性。

1 多层信息融合思想

信息获取和依据信息的决策处理贯穿人类生活的整个过程,也是当今信息时代广为关注的问题之一。在人类行为中,仅仅依靠单传感器或信息源是难以精确稳健地完成需要的决策任务,这方面对于复杂、多层次、多变化的决策任务尤为显著。因此多源多层信息融合的研究日趋重要。

信息融合是一个多变量决策问题,其基础问题是围绕融合单元和融合结构展开。每个融合单元都涉及三个基本组成部分:变量、决策方法和决策结果;融合结构都要涉及融合单元的结构形式、结构形式对决策处理要求及其结果的影响、特殊的融合结构形式等。由于信息融合过程中,融合单元都可能采取数据、特征、决策等不同的形式,于是形成了数据层融合、特征层融合和决策层融合的层次划分^[7]。

- 1) 数据层融合。即输入为原始数据,输出为筛选整理后的数据。
- 2) 特征层融合。即输入为经过处理的基本数据,输出为对数据进行分析后的特征。
- 3) 决策层融合。即输入为提取后的特征,输出为最终需要的结果结论。

实际中常见信息融合的输入输出列举如表 1。

表 1 融合单元的信息输入输出

Tab.1 The input and output of information fusion

序号	融合输入	融合输出	特点
1	数据	数据	维数相同,接近原始信息
2	数据	特征	第一级处理,获取数据特性
3	特征	特征	输入为定性定量,产生超级特征
4	特征	决策	对特征空间进行分类识别
5	决策	决策	综合结论,做出最终决策

其中第二种融合输入为数据、融合输出为特征的层次,依据关心重点不同可以分别划归为第

一和第三层次;第四种融合输入为特征,融合输出为决策的层次依据关心重点不同可以分别划归为第三和第五层次。在多层信息融合的电网故障诊断中,将表 1 中的第一二层次合并、第三四层次合并,这样通常情况下的信息融合还是以数据、特征和决策三层划分。图 1 为由信息源数据输入出发的多层信息融合关系图。

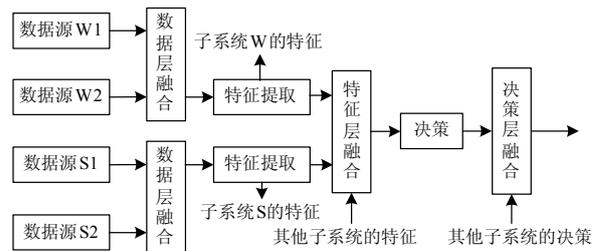


图 1 多层信息融合的结构图

Fig.1 Structure of the multilayer information fusion

2 多层信息融合架构下的电网故障诊断辅助决策模型

电网故障诊断辅助决策本身就是一个多变量的决策问题。大规模电网发生故障必然涉及电网多级控制中心,而在同一级控制中心内部,故障表征信息又分布在不同的应用系统中,如 SCADA 系统,广域相量测量系统(WAMS)、保护故障信息管理系统(RPMS)等,因此在电网故障诊断辅助决策过程中必然涉及到多源多层信息融合的问题。

下面从多层信息融合的角度对电网故障诊断辅助决策过程进行分析,首先分析其数据、特征、决策对应故障诊断中涉及到的参数对象(表 2)。

表 2 信息融合概念与电网故障诊断对象对应关系

Tab.2 Concept of information fusion mapping onto the objects in diagnosis process

信息融合概念	电网故障诊断中的涉及对象
数据	各应用系统中提供的信息记录报表,如故障滤波、保护开关动作记录、带时标的量测信息
特征	保护状态、开关状态、保护开关动作时序信息、电压值、相角值
决策	故障元件、故障原因

2.1 数据层融合

电网故障诊断辅助决策的数据层融合其融合输入为数据、融合输出为特征。其数据为 SCADA 系统、广域相量测量系统(WAMS)、保护故障信息管理系统(RPMS)等多个信息源提供的信息(其对应数据见表 3)。通过对这些不同格式的数据进行融合,获取进行下一层次辅助决策的特征,即保护开关状态、保护开关动作时序信息、用于故障分析的

节点电压、相角等。

在电网故障诊断辅助决策过程中对数据融合层的融合过程可采用加权平均算法^[6]:

$$q(x) = \arg \max_{j=1}^N \left(\frac{1}{K} \sum_{i=1}^K \omega_i y_{ij}(x) \right) \quad (1)$$

其中: $y_{ij}(x)$ 为数据层的输入即为原始数据; ω_i 为对应原始数据的信任度; $q(x)$ 为数据层结果输出。例如对不同数据源提供的某一时刻的有效电压电流数据, 如果仅采用单一数据源数据有失准确性, 这时可采用加权平均方法, 对数据进行融合校正。

表 3 各信息源对应的数据

系统	数据信息
SCADA	(1) 电网模型和拓扑
	(2) 开关信息、保护动作及 SOE
	(3) 量测及越限警告
	(4) 历史信息
WAMS	(1) 开关动作
	(2) 带时标及相角的量测
RPMS	(1) 保护动作
	(2) 保护配置
	(3) 故障录波

2.2 特征层融合

电网故障诊断辅助决策中的特征层融合其融合输入为特征, 融合输出为决策。本层次的信息融合所采用的特征是数据层融合的输出结果, 即保护开关状态、保护开关动作时序信息、用于故障分析的节点电压、相角、潮流特征。通过对这些特征进行分析处理, 来获取故障诊断辅助决策初步结果。目前来说, 对于故障诊断的研究主要集中在这一层次, 常见的方式主要有根据保护开关动作信息, 采用优化模型、贝叶斯方法、专家系统等进行故障诊断^[8]; 利用时序信息识别误动拒动情况的发生, 再结合保护开关动作信息进行故障元件识别。而实际中, 故障发生后的故障录波器记录也蕴藏了丰富的故障信息, 分析其记录的电压电流波形变化情况, 可以得出一些相应的故障决策信息, 这一方面的研究将在下一步工作中开展。

本文选取继电保护信息和WAMS信息进行特征层的信息融合, 方法如下:

1) 对 WAMS 信息的融合。采用故障模式匹配的方式, 即将实时的潮流分布与各种预想故障的潮流分布进行相似性比较, 获取元件 n 发生故障的信任度。这里定义一个模式匹配度函数^[9]:

$$l_n = d_n^{-1} = \left\{ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |\theta_{ni} - \theta_i|^m \right\}^{-1} \quad (2)$$

式中: l_n 为实际测量样本与预想故障集中元件 n 发生故障时的相似程度; d_n 实际表示的是样本与元件 n 发生故障时之间的差异程度; θ_{ni} 为元件 n 故障下节点 i 处的相角; θ_i 为实时潮流计算的节点 i 处的相角值(待分类样本); N 为节点个数, 本文的计算中, m 取值为 4。

在一般 $N-1$ 故障下, 元件 n 发生故障的信任度 $P_n^{(1)}$:

$$P_n^{(1)} = l_n / \sum_{i=1}^N l_i \quad (3)$$

2) 对继电保护信息的融合。这里采用概率信息和 Petri 网结合诊断方法^[10], 通过建立继电保护动作的 Petri 网模型, 可以得出目标元件发生故障的信任度, 得到电网中的元件 n 对应故障信任度 $P_n^{(2)}$ 。

2.3 决策层融合

电网故障诊断辅助决策的决策层融合其输入是特征层的初步决策输出即不同信息源故障信息融合后的决策, 输出结果为最终决策。该层次中的输入决策包含了可能故障元件及其信任度, 输出决策为最终故障元件的判定结果。根据这一层输入的数据形式, 采用证据理论融合输入信息^[11], 获取最终决策。另外简单化的处理方法也可以采用一般的加权平均算法处理输入信息来得出最终决策。

根据上面三层信息融合的定义, 多信息源下的三层信息融合电网故障诊断模型构架如图 2。

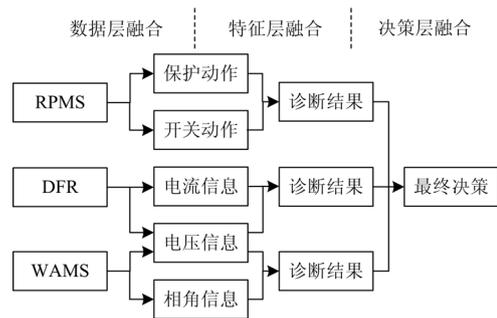


图 2 多层信息融合电网故障诊断辅助决策模型架构
Fig.2 Structure of fault diagnosis assistant decision-making based on multilayer information fusion

3 实例分析

在某时刻 T , 节点 9 和 14 之间的线路出现接地故障。通过仿真测试获取模拟 SCADA 系统, 广域相量测量系统 (WAMS)、保护故障信息管理系统

(RPMS)的故障信息,然后通过上述多层信息融合模型进行故障诊断的辅助决策过程。

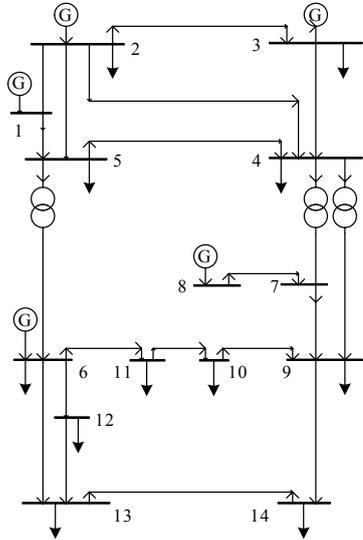


图3 IEEE14 节点系统
Fig.3 IEEE14 bus system

3.1 数据层融合过程

分析发生故障后 WAMS 中的系列 PMU 量测数据,处理量测数据得到各节点电压相角(表4)。

表4 由 WAMS 信息获得的节点电压相角
Tab.4 Phase angles from WAMS information

节点	相角
1	0
2	-4.99
3	-12.80
4	-10.19
5	-8.89
6	-14.93
11	-15.11
12	-16.02
13	-16.19

处理来自 SCADA 和 RPMS 的数据,得到保护开关动作信息为:线路主保护动作,断开线路 L₉₋₁₄上 14 节点处的断路器,而 9 节点处断路器未动作,这时线路 L₇₋₉和 L₉₋₁₀上的远后备保护动作,分别断开线路 L₇₋₉和 L₉₋₁₀上 7 节点端和 10 节点端的断路器。

3.2 特征层融合过程

下面是通过仿真计算,预先建立起的不同支路出现故障情况下的预想事故集^[9],其内容为电压相角信息(表5)。

将出现故障时量测来的故障数据(表4)同预想事故集(表5)中的数据进行匹配,根据公式(2)

求出不同故障情况下的模式匹配度(表6)。

表5 预想事故集下的节点电压相角
Tab.5 Phase angles of the fault assumptions

节点	L ₇₋₉	L ₉₋₁₀	L ₉₋₁₄	L ₁₃₋₁₄
1	0	0	0	0
2	-4.98	-5.01	-5.00	-5.02
3	-12.85	-12.93	-12.92	-12.97
4	-10.41	-10.54	-10.52	-10.62
5	-9.20	-9.12	-9.13	-9.07
6	-16.84	-15.35	-15.54	-14.48
7	-10.41	-13.60	-13.49	-14.13
8	-10.41	-13.60	-13.49	-14.13
9	-19.97	-15.25	-15.08	-16.03
10	-19.84	-17.76	-15.59	-16.18
11	-18.56	-16.77	-15.76	-15.54
12	-18.13	-16.39	-16.97	-15.42
13	-18.45	-16.50	-17.39	-15.46
14	-20.60	-17.10	-20.36	-18.34

表6 故障相似性匹配度

Tab.6 Degrees of the fault comparability

可能故障线路	模式匹配度 I_n
L ₇₋₉	0.05
L ₉₋₁₀	1.15
L ₉₋₁₄	17.64
L ₁₃₋₁₄	2.70

根据公式(3)得出初步故障辅助决策信息即不同线路出现故障的信任度(表7)。

表7 WAMS 提供的初步辅助决策

Tab.7 Primary assistant decision from WAMS

可能故障线路	故障信任度 $P_n^{(1)}$
L ₇₋₉	0.002
L ₉₋₁₀	0.053
L ₉₋₁₄	0.819
L ₁₃₋₁₄	0.126

通过概率 Petri 网的融合方法来处理保护开关动作信息,得出故障辅助决策结果如表8。

表8 保护开关信息融合后的初步辅助决策

Tab.8 Primary assistant decision from the relay protective information

可能故障线路	故障信任度 $P_n^{(2)}$
L ₇₋₉	0.075
L ₉₋₁₀	0.075
L ₉₋₁₄	0.825
L ₁₃₋₁₄	0.025

3.3 决策层融合过程

根据表 7 和表 8 的故障辅助决策初步结果, 再进行最终的决策层融合, 采用加权平均算法得出电网故障诊断的辅助决策结论: 支路 L₉₋₁₄ 发生故障的概率为 0.82, 而支路 L₇₋₉ 发生故障的概率为 0.04, 支路 L₉₋₁₀ 发生故障的概率为 0.06, 支路 L₁₃₋₁₄ 发生故障的概率为 0.08。

4 结论

本文分析了电力系统故障诊断辅助决策的一些特点, 用信息融合思想构建了多层信息融合的电网故障诊断辅助决策构架, 提出了多信息源故障辅助决策信息的融合方法, 探索了对 WAMS 信息中节点电压相角的处理思路, 并通过 IEEE14 节点系统检验了上述方法的有效性。结果表明, 智能电网下的多层信息融合电网故障诊断辅助决策研究具有良好的可行性, 对故障诊断的最终决策提供了更广泛的可靠信息, 在未来电网智能化的趋势下, 这些方法和思路具有广阔的应用前景。

参考文献

- [1] 郭创新, 朱传柏, 曹一家, 等. 电力系统故障诊断的研究现状与发展趋势[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 102-107.
- GUO Chuang-xin, ZHU Chuan-bai, CAO Yi-jia, et al. State of arts of fault diagnosis of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(8): 102-107.
- [2] Tan J C, Crossly P A, Goody J, et al. Fault section identification on a transmission network using action factors and expert system technology[C]. // 13th Power Systems Computation Conference(PSCC'99). Trondheim (Norway): 1999.
- [3] 毕天姝, 倪以信, 吴复立. 基于新型神经网络的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 73-78.
- BI Tian-shu, NI Yi-xin, WU Fu-li. A novel neural network approach for fault section estimation[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 73-78.
- [4] LIU Yi, LI Ying, CAO Yi-jia, et al. Forward and backward models for fault diagnosis based on parallel genetic algorithms[J]. Journal of Zhejiang University: Science A, 2008, 9(10): 1420-1425.
- [5] 赵伟, 白晓民, 丁剑, 等. 基于协同式专家系统及多智能体技术的电网故障诊断方法[J]. 中国电机工程学

报, 2006, 26(20): 1-8.

ZHAO Wei, BAI Xiao-min, DING Jian, et al. A new fault diagnosis approach of power grid based on cooperative expert system and multi-agent technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(20): 1-8.

- [6] 符玲, 何正友, 麦瑞坤, 等. 小波熵证据的信息融合在电力系统故障诊断中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(13): 64-69.
- FU Ling, HE Zheng-you, MAI Rui-kun, et al. Information fusion method of entropy evidences and its application to fault diagnosis in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(13): 64-69.
- [7] 王润生. 信息融合[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 10-13.
- [8] 吴欣, 郭创新, 曹一家. 基于贝叶斯网络及信息时序属性的电力系统故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 14-18.
- WU Xin, GUO Chuang-xin, CAO Yi-jia. A new fault diagnosis approach of power system based on bayesian network and temporal order information[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 14-18.
- [9] 游家训. 基于多源信息的电网故障诊断研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [10] 孙静, 秦世引, 宋永华. 一种基于Petri网和概率信息的电力系统故障诊断方法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(13): 10-14, 23.
- SUN Jing, QIN Shi-yin, SONG Yong-hua. A fault diagnosis method for power systems based on Petri nets and probability information[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(13): 10-14, 23.
- [11] 张阳, 何正友, 林圣. 一种基于DS证据理论的电网故障诊断方法[J]. 继电器, 2008, 36(9): 5-10.
- ZHANG Yang, HE Zheng-you, LIN Sheng. A power system fault diagnosis method based on DS evidence theory[J]. Relay, 2008, 36(9): 5-10.

收稿日期: 2010-01-25; 修回日期: 2010-03-03

作者简介:

刘毅(1983-), 男, 博士研究生, 研究方向为电力系统故障诊断、智能电网相关技术应用等; E-mail: powersystemee@163.com

高振兴(1984-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统故障诊断、设备智能状态检修等;

郭创新(1969-), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能电网和分布式能源并网、智能信息处理技术及其在电力系统中的应用。