

文章编号: 1671- 251X(2010) 10- 0045- 04

基于数据融合的高压断路器故障诊断方法研究

苗红霞^{1,2,3}, 王宏华²

(1. 河海大学计算机与信息学院, 江苏 常州 213022; 2. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 3. 常州市输配电及节电技术重点实验室, 江苏 常州 213022)

摘要: 为了提高高压断路器的故障诊断水平, 对采用 D- S 证据理论将不同类型传感器获得的信息进行数据融合的方法进行了研究, 并将其运用到高压断路器的故障诊断中。实例分析结果表明, D- S 证据理论能够提高高压断路器故障诊断的进度、准确性和可靠性, 并且融合的数据越多, 故障诊断的可靠性越高。该方法具有普遍适用性。

关键词: 高压断路器; 故障诊断; 多传感器; 数据融合; D- S 证据理论

中图分类号: TD611. 5 **文献标识码:** B

Research of Fault Diagnosis Method for High voltage Circuit Breaker Based on Data Fusion

MIAO Hong-xia^{1,2,3}, WANG Hong-hua²

(1. School of Computer and Information Engineering of Hohai University, Changzhou 213022, China.
2. School of Energy and Electrical Engineering of Hohai University, Nanjing 210098, China.
3. Changzhou Key Laboratory of Power Transmission, Distribution and Saving Technologies, Changzhou 213022, China)

Abstract: In order to improve fault diagnosis level of high-voltage circuit breaker, the method of using D-S evidence theory to fuse data obtained by different types of sensors was researched and it was used in

收稿日期: 2010- 06- 07

基金项目: 常州市输配电及节电技术重点实验室开放课题

(CS0904)

作者简介: 苗红霞(1968-), 女, 河北邯郸人, 讲师, 河海大学在读博士研究生, 主要研究方向为电气设备故障诊断新技术。E-mail: miaohx@hhuc.edu.cn

参考文献:

- [1] 王兆安, 杨君, 刘进军. 谐波抑制与无功补偿技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1998.
- [2] 罗安. 电网谐波治理和无功补偿技术及装备[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [3] 缙新科, 牟英, 汪昶江, 等. 并联混合型有源电力滤波器仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(17): 13-15.
- [4] 党存禄, 王德福, 张晓英, 等. 串联混合型有源电力滤波器稳定性分析[J]. 电气自动化, 2009, 31(2): 51-53.
- [5] SENINIS, WOLFS P J. Analysis and Design of a Multiple-loop Control System for a Hybrid Active Filter [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2002, 49(6): 1283-1292.
- [6] 陆秀令, 周腊吾, 张松华, 等. 电力谐波滑窗迭代 DFT 检测算法的研究与仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(14): 3652-3655.
- [7] LUO An, SHUAI Zhikang, ZHU Wenji, et al. Development of Hybrid Active Power Filter Based on the Adaptive Fuzzy Dividing Frequency control Method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(1): 424-432.
- [8] 代俊光. 一种周期信号测量中的自适应抽样算法[J]. 电子学报, 1998, 26(8): 1113-1142.

fault diagnosis for high voltage circuit breaker. Analysis of an actual example showed that D-S evidence theory can improve speed, correctness and reliability of fault diagnosis for high voltage circuit breaker, and the more fused data there is, the higher reliability of fault diagnosis is. Besides, the method has universality.

Key words high voltage circuit breaker, fault diagnosis, multisensor, data fusion, D-S evidence theory

0 引言

高压断路器是电网中重要的电气设备,对高压断路器故障进行在线诊断,对实现电力系统的稳定可靠运行具有重要意义。高压断路器结构复杂,引起其故障的因素有很多,在断路器的故障诊断中应充分利用各种信息,而不能仅局限于一种信息。因为从本质上讲,设备故障诊断系统是利用诊断对象的各种状态信息(即从多传感器获得的各种信息)和已有的知识进行综合处理,最终获得关于高压断路器运行状态和故障状况的综合评价。此外,从诊断学角度来看,任何一种诊断信息都是模糊的、不精确的。对于任何一种诊断对象,单用一个方面的信息来反映其状态行为都是不完整的,只有从多方面获得关于同一个对象的多维信息,并对这些信息加以融合利用,才能对设备进行更可靠、更准确的监测与诊断。为了提高高压断路器的故障诊断水平,有必要引入多传感器数据融合技术^[1-4]。

数据融合方法主要有贝叶斯估计法、D-S 证据理论、专家系统、可靠性理论等。贝叶斯估计法在给定一个先验似然估计和附加证据条件下,能更新一个假设的似然函数。但该方法需要先验知识,且当多个可解的假设和多个条件相关时,该方法就显得很复杂。贝叶斯估计法要求每个传感器必须在公共抽象级上以贝叶斯可信度做出响应,而实际上大多数传感器不可能提供这种响应,即很难根据贝叶斯估计法给出精确的可信度表示。专家系统是具有解决特定问题所需专门领域知识的计算机程序系统,也称基于知识的系统,主要用于模仿人类专家的思维活动,通过推理与判断求解问题。一个专家系统主要由 2 个部分组成:一个称为知识库的知识集合,它包含待处理问题领域的知识,通常由数据库管理系统来组织和实现;另一个称为推理机的程序模块,它包含一般问题求解过程所用的推理方法和控制策略的知识,通常由具体的程序来实现。专家系统适用于缺乏合适算法求解问题而往往又能采用领域专家经验来求解问题的场合^[5]。

D-S 证据理论可以看作是有限域上对经典概率推理理论的一般化扩展,其主要特性是支持描述不同等级的精确度和直接引入了对未知不确定性的描述。该算法具有很强的处理不确定信息的能力。它不需要先验信息,对不确定信息的描述采用“区间估计”而不是“点估计”的方法,解决了关于“未知”即不确定性的表示方法,在区分不知道与不确定方面以及精确反映证据收集方面显示出很大的灵活性^[6]。因此,本文将 D-S 证据理论应用于高压断路器的故障诊断,具有实际意义。

1 D-S 证据理论

1.1 识别框架

设 Θ 为某个事件可能结果的有限集,而且假设这些结果中有且只有一个是正确的,则 Θ 为这个事件的识别框架。 Θ 的所有子集所构成的集合就是 Θ 的幂集,记为 2^Θ 。

1.2 基本信度分配

设 Θ 为识别框架。如果集函数 m 满足映射: $2^\Theta \rightarrow [0, 1]$, 且满足:

- (1) $m(\phi) = 0$ (ϕ 为空集);
- (2) 对 $\forall A \subset 2^\Theta$, $m(A) \geq 0$, 并且有

$$\sum_{A \subset \Theta} m(A) = 1 \quad (1)$$

则称 m 为识别框架 Θ 上的基本信度分配。基本信度分配函数一般由主观经验给出,是一种可信度。对于满足 $m(A) > 0$ 的所有集合 A , 称为 m 的焦点元,简称焦元。

1.3 信度函数

信度函数的定义: 对于任意 $A \subseteq \Theta$ 有

$$Bel(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (2)$$

式中: $Bel(A)$ 表示对 A 的信任度,它表示对 A 信任的最低限度,也称为下限函数。

1.4 似真度函数

设 Bel 是识别框架 Θ 上的一个信度函数。定义函数 Dou 和 pl :

$$\forall A \in \Theta \quad Dou(A) = Bel(\bar{A}), \text{ 则}$$

$$pl(A) = 1 - Bel(\bar{A}) \tag{3}$$

称 Dou 为 Bel 的怀疑度函数, pl 为 Bel 的似真度函数。 $\forall A \in \Theta, Dou(A)$ 称为 A 的怀疑度, 表示对 A 怀疑的程度; $pl(A)$ 称为 A 的似真度, 表示对 A 不怀疑的程度, 也是对 A 信任的最高限度, 所以也称为上限函数。

1.5 信任区间

$[Bel(A), pl(A)]$ 称为 A 的一个信任区间, 它表示对 A 信任的上、下限, 如 $[0, 0]$ 表示 A 为假, $[1, 1]$ 表示 A 为真, 而 $[0, 1]$ 表示对 A 一无所知。可见, 信任区间越大, 对 A 的不确定程度越大, 信任区间越小, 对 A 的确定程度越大; $Bel(A)$ 越大, 表示 A 为真的可能越大, $pl(A)$ 越小, 表示 A 为假的可能越大。

1.6 Dempster 合成法则

设 Bel_1 和 Bel_2 是同一识别框架 Θ 上的 2 个信度函数, m_1 和 m_2 分别是其对应的基本信度分配, 其焦元分别为 A_1, A_2, \dots, A_k 和 B_1, B_2, \dots, B_l 。

对于给定的焦元 $A \subseteq \Theta$ 如果有 $A_i \cap B_j = A$, 那么 $m_1(A_i)m_2(B_j)$ 就是确切地分配到 A 上的一部分基本信度值, 所以确切地分配到 A 上的总的基本信度值为

$$m(A) = \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i)m_2(B_j) \tag{4}$$

但是当 A 为空集时, 按照上述方法, 仍然会有一部分信度值分配到 A 上, 这与事实是矛盾的, 因此, 必须丢弃这一部分信度值。但是丢弃这一部分信度值后, 总的信度值就会小于 1, 可以在每一个基本信度值的基础上乘以一个系数 K 来满足总的基本信度值为 1 的要求, 该方法称为归一化。 K 的计算公式为

$$K = \frac{1}{1 - \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i)m_2(B_j)} \tag{5}$$

D-S 证据理论中, 用 K_1 来衡量证据冲突与否:

$$K_1 = \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i)m_2(B_j) \tag{6}$$

如果有

$$K_1 = \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i)m_2(B_j) < 1 \tag{7}$$

则表明 m_1 和 m_2 不冲突, A 的基本信度分配为

$$m(A) = \begin{cases} 0 & A = \phi \\ K \cdot \sum_{A_i \cap B_j = A} m_1(A_i)m_2(B_j) & A \neq \phi \end{cases} \tag{8}$$

基本信度分配 m 称为 m_1 和 m_2 的直和, 记为 $m_1 \oplus m_2$ 。对应的信度函数 Bel 也称 Bel_1 和 Bel_2 的直和, 记为 $Bel_1 \oplus Bel_2$ 。

如果式(7)不成立, 则直和 $m_1 \oplus m_2$ 不存在, 表明 m_1 和 m_2 是完全冲突的, Dempster 合成失效。所以对 m_1 和 m_2 进行合成的前提是式(7)成立。

2 D-S 证据理论在高压断路器故障诊断系统中的应用

2.1 应用 D-S 证据理论解决问题的一般步骤

应用 D-S 证据理论解决实际问题的关键在于建立一个好的数学模型, 以便于对问题进行定量的分析计算。其大致过程:

(1) 建立所研究问题的识别框架。分析实际问题及可能出现的结果, 建立一个满足证据理论要求的识别框架 Θ 。

(2) 建立基本的信度分配。根据以往各方面的经验和数据, 在幂集 2^Θ 上建立与不同证据(k 个证据)相对应的基本信度分配 m_1, m_2, \dots, m_k 。

(3) 计算所要研究的子集的信度分配 m 、信度函数 Bel 和似真函数 pl 。不同的问题所关心的子集 A 是不同的, 要根据不同的实际问题确定相应的子集 A , 然后在已经建立好的识别框架的基本信度分配中找到与 A 相关的焦元($A_i \cap B_j = A$), 利用 D-S 合成法则建立基本信度分配。

(4) 根据计算结果给出结论。

2.2 应用算例分析

在高压断路器故障诊断系统中, 以对传动拐臂转角、动触头行程和分闸弹簧弹力这 3 个证据信号数据应用 D-S 证据理论进行融合判断为例进行介绍。以这 3 个信号的基本信度分配建立研究问题的识别框架, 共有 4 种状态输出, 依次记为正常 A、故障 B(触头弹簧失效)、故障 C(分闸弹簧轴销脱落)、故障 D(分闸弹簧失效)。在某一时刻采集这 3 个信号, 它们的基本信度分配如表 1 所示。

表 1 3 个传感器信号的基本信度分配

传感器	正常 A	故障 B	故障 C	故障 D
传感器 1 (转角传感器)	$m_1(A) = 0.120\ 9$	$m_1(B) = 0.632\ 7$	$m_1(C) = 0.030\ 7$	$m_1(D) = 0.215\ 7$
传感器 2 (弹力传感器)	$m_2(A) = 0.021\ 5$	$m_2(B) = 0.912\ 6$	$m_2(C) = 0.055\ 4$	$m_2(D) = 0.010\ 5$
传感器 3 (行程传感器)	$m_3(A) = 0.009\ 1$	$m_3(B) = 0.972\ 1$	$m_3(C) = 0.014\ 4$	$m_3(D) = 0.004\ 4$

根据表 1 建立 3 个对应的基本信度分配 m_1 、 m_2 、 m_3 , 对 m_1 和 m_2 进行合成, 即将传感器 1 和传感器 2 进行融合, 得到 m' 。合成之前, 先根据式(7)判断能否进行合成, 如果不能则合成失败。

$$K_1 = \sum_{A_i \cap B_j \cap C_k \cap D_l} m(A_i)m(B_j)m(C_k)m(D_l) =$$
$$m_1(A)[m_2(B) + m_2(C) + m_2(D)] +$$
$$m_1(B)[m_2(A) + m_2(C) + m_2(D)] +$$
$$m_1(C)[m_2(A) + m_2(B) + m_2(D)] +$$
$$m_1(D)[m_2(A) + m_2(B) + m_2(C)] =$$
$$0.4160 < 1$$

所以, 传感器 1 和传感器 2 可融合。

$$K = \frac{1}{1 - K_1} = \frac{1}{1 - 0.4160} = \frac{1}{0.5840} = 1.7123$$
$$m(A)' = Km_1(A)m_2(A) = 0.0044$$
$$m(B)' = Km_1(B)m_2(B) = 0.9887$$
$$m(C)' = Km_1(C)m_2(C) = 0.0029$$
$$m(D)' = Km_1(D)m_2(D) = 0.0039$$

由此可得到将传感器 1 和传感器 2 融合后的各故障基本信度分配, 如表 2 所示。

表 2 传感器 1 和传感器 2 融合后的各故障基本信度分配

正常 A	故障 B	故障 C	故障 D
$m(A)' =$ 0.0044	$m(B)' =$ 0.9887	$m(C)' =$ 0.0029	$m(D)' =$ 0.0039

从表 2 可看出, 高压断路器故障为故障 B(触头弹簧失效)的概率最大, 大约为 0.9887, 其它的可能性都比较小, 而且融合后故障 B 的概率比单个证据的概率增大了, 而其它的却比单个证据的概率减小了, 这说明用 2 个证据融合更能证明断路器是故障 B 状态。为了能得到更加准确的结论, 将融合后的结果再与传感器 3 判定的结果进行融合, 即对 m' 和 m_3 进行合成, 得到 m 。

$$K'_1 = m(A)'[m_3(B) + m_3(C) + m_3(D)] +$$
$$m(B)'[m_3(A) + m_3(C) + m_3(D)] +$$
$$m(C)'[m_3(A) + m_3(B) + m_3(D)] +$$
$$m(D)'[m_3(A) + m_3(B) + m_3(C)] =$$
$$0.0387 < 1$$

可见 m' 和 m_3 可合成。

$$K' = \frac{1}{1 - K'_1} = \frac{1}{1 - 0.0387} = \frac{1}{0.9613} = 1.0403$$
$$m(A) = K'm(A)'m_3(A) = 4.165 \times 10^{-5}$$
$$m(B) = K'm(B)'m_3(B) = 0.9998$$
$$m(C) = K'm(C)'m_3(C) = 4.344 \times 10^{-5}$$

$$m(D) = K'm(D)'m_3(D) = 1.785 \times 10^{-5}$$

由此可得到将 3 个传感器融合后的各故障基本信度分配, 如表 3 所示。

表 3 3 个传感器融合后得到的各故障基本信度分配

正常 A	故障 B	故障 C	故障 D
$m(A) =$ 4.165e-005	$m(B) =$ 0.9998	$m(C) =$ 4.344e-005	$m(D) =$ 1.785e-005

从表 3 可看出, 高压断路器故障为故障 B(触头弹簧失效)的概率最大, 概率为 0.9998, 比 2 个传感器融合的概率又增大了一点, 而其它故障发生的概率几乎为 0。从处理结果来看, 高压断路器应该工作在故障 B(触头弹簧失效)状态。

表 3 中的基本信度分配同时也是信度函数, 所以故障 B 为真的最低可能性为 0.9998, 而最大可能性接近于 1。所以其信任区间为[0.9998, 1], 故障 B 为真的可能性很大。从表 2 和表 3 可看出, 多进行一次数据融合, 故障诊断的可靠性越高。所以 D-S 证据理论可以提高故障诊断的进度和可靠性。

3 结语

将 D-S 证据理论的数据融合模型用于高压断路器的故障诊断, 对不同传感器的证据进行数据融合, 增强了故障诊断系统的诊断能力, 使得诊断结果更加明确。该研究成果不仅可应用于高压断路器, 也可扩展应用于其它油断路器和 SF₆ 断路器或其它电力设备, 具有普遍适用性。

参考文献:

[1] 陈理渊. 多传感器数据融合及其在电机故障诊断中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2005.

[2] STEINMEIER C, SCHWARZ M, HOLECZ F, et al. The Evaluation of Different Sensors and Techniques for the Detection of Storm Damages in Forests[C]// IEEE International Geosciences and Remote Sensing Symposium Proceeding, 2002, Toronto: 1774-1776.

[3] 付炜. 基于特征级数据融合的遥感图像重构模式研究[J]. 电子学报, 2005, 33(6): 1143-1145.

[4] 王其军, 程久龙. 基于信息融合技术的瓦斯传感器故障诊断研究[J]. 工矿自动化, 2008(2): 22-25.

[5] 韩崇昭, 朱洪艳, 段战胜, 等. 多源信息融合[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.

[6] DUCEY M J. Representing Uncertainty in Silvicultural Decisions: an Application of the Dempster-Shafer Theory of Evidence [J]. Forest Ecology and Management, 2001, 150(3): 199-211.