

基于改进 D-S 证据决策准则的 电力系统故障诊断

徐青山¹, 唐国庆¹, 成 勋², Tobias Mirbach³

(1. 东南大学 电气工程系, 江苏 南京 210096;

2. 上海电力股份有限公司 闵行发电厂, 上海 200245;

3. 亚琛工业大学, 德国 亚琛 52064)

摘要: 传统的故障诊断方法容易导致“诊断阻塞”以及“维数灾”的问题。针对诊断信息冲突或不健全的缺陷, 提出用改进的 D-S(Dempster-Shafer)证据决策方法进行电力系统故障的诊断。引入聚焦系数 λ , 进行证据合成时依据子集的基数大小优化组合信度分配, 解决了高冲突证据的死解问题。以电力变压器故障诊断为例进行了分析验证, 结果表明: 基于改进的决策准则诊断方法具有较好的容错能力, 实现信息的互补, 突出了故障征兆的共性信息, 从而极大地提高了信息的利用率, 减少了系统诊断的不确定性。

关键词: 电力系统; 证据决策; 故障诊断; 信度函数

中图分类号: TM 930.9

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)08-0050-03

0 引言

近几年国内外电力系统故障诊断相关算法的研究很多, 包括基于神经网络的快速诊断方法^[1], 基于专家系统组合推理的诊断方法^[2], 基于扩展 Petri 网模型的诊断方法^[3]等。这些算法均不乏其合理性与先进性, 但在实际应用中常会暴露出类似的致命缺陷, 即对于那些相悖甚至完全冲突的信息一筹莫展, 容错性极差; 诊断问题具有一定规模时, 极易导致“维数灾”的问题。如何全面考察所有可能的信息, 依据综合权重作出足够正确的判断, 这是信息融合技术的长处, D-S(Dempster-Shafer)证据理论便是其杰出代表。证据理论允许把整个问题和证据分解为若干个子问题、子证据, 分别处理之后再利用 Dempster 合成法则形成整个问题的解。

1 D-S 证据理论^[4]

D-S 决策证据理论是目前信息融合中最常用的一种方法。它建立了广义贝叶斯理论, 根据人的推理模式, 采用概率区间和不确定区间来决定多个证据下假设的似然函数。

1.1 基本定义

定义 1 如果某一判决问题的所有可能的结果集合能用 Θ 表示, 则称 Θ 为辨识框架。 Θ 的所有子集所构成的集合就是 Θ 的幂, 记为 2^Θ 。

定义 2 若 Θ 是一个辨识框架, 函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 称为基本信度分配, 仅当

a. $m(\phi) = 0, \phi$ 为空集;

b. 对 $\forall A \subset 2^\Theta, m(A) \geq 0$, 且 $\sum_{A \subset \Theta} m(A) = 1$, 对于

满足 $m(A) > 0$ 的所有集合 A , 称为 m 的焦点;

c. 设 Θ 是一个辨识框架, 如集函数 $\text{Bel}: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ 满足 $\text{Bel}(\phi) = 0, \text{Bel}(\Theta) = 1; \forall A_1, A_2, \dots, A_n \subseteq \Theta$, $\text{Bel}(\bigcup_{i=1}^n A_i) \geq \sum_{I \subseteq \{1, 2, \dots, n\}} (-1)^{|I|+1} \text{Bel}(\bigcap_{i \in I} A_i)$, 则称 Bel 为辨识框架 Θ 上的信度函数。

1.2 D-S 合并准则

当有两个及以上的证据对同一子集或两个交不为空的子集分配信度时就产生可信度函数组合, D-S 证据理论给出下列 D-S 合并准则:

$$m(C) = \begin{cases} 0 & C = \phi \\ k \sum_{A \cap B = C} m_1(A) m_2(B) & C \neq \phi \end{cases}$$

其中 $m(C)$ 亦可记为 $m_1 \oplus m_2$, k 称为规约系数, 且

$$k = \frac{1}{1 - \sum_{A \cap B = \phi} m_1(A) m_2(B)}$$

k 能描述证据信息的冲突特性, 当 $A \cap B = \phi$ 时, $\text{Bel}(A)$ 和 $\text{Bel}(B)$ 所对应的两个不相容的证据即在整个问题上发生了严重冲突。

1.3 基于证据理论的不确定性推理

诊断目标问题的推理基本遵循以下步骤:

a. 建立问题的辨识框架 Θ ;

b. 定义幂集 2^Θ 基本信度分配;

c. 计算所关心的子集 $A \subseteq 2^\Theta$ 的信度函数;

d. 由组合信度函数给出诊断结论。

证据的组合与推理过程是不确定值沿推理网络传播的过程, 即证据不断组合 (信任函数 Bel 合成) 的过程 (见图 1)。

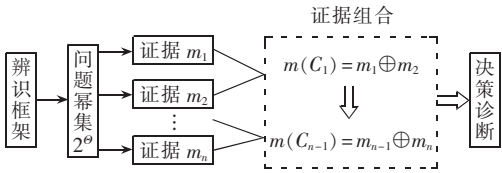


图 1 基于证据理论的不确定性推理

Fig.1 Deduction of uncertainty based on evidence theory

2 改进的 D-S 证据决策^[5~8]

2.1 问题的提出

对于证据相容的情况(两两之间不会发生冲突),经过 D-S 证据合成处理会增强对同一目标的支持,但实际情况不会这么理想,往往要复杂的多。考虑同一辨识框架 Θ ,采集到如下两种情况下的证据:

- a. $m_1(A) = 1.0, m_2(B) = 1.0$;
- b. 焦元 $A = \{a\}, B = \{a, b\}, m_1(A) = 0.7, m_2(B) = 0.8$ 。

对于第一种情况,证据 1 完全支持子集 A 否定 B ,证据 2 完全支持 B 而否定 A ,这是完全冲突的两个证据,此时由于规约系数 $k \rightarrow \infty$,D-S 证据合成准则失效,这种情况显然不是所期望的;对于第二种情况,证据 1 对 $\{a\}$ 的支持度为 70 %,证据 2 对 $\{a, b\}$ 的支持度为 80 %,组合的结果为 $m(\{a\}) = 70 \%$, $m(\{a, b\}) = 24 \%$, $m(\Theta) = 6 \%$ 。这样的结果也不是很尽人意,因为相容的证据没有使得子集 $\{a\}$ 的支持度得到提升,反而仅仅是降低了子集 $\{a, b\}$ 的支持度。为了解决上述问题,需要对定义进行必要的改进。

2.2 改进的定义

定义 1 $k = \sum_{A_i \cap B_j = \phi} m_1(A_i) m_2(B_j)$

$$\lambda = \frac{\|A_i \cap B_j\|}{\|A_i\| + \|B_j\| - \|A_i \cap B_j\|}$$

其中 $\|\cdot\|$ 为集合的基数, λ 称为聚焦系数,将大子集上的信度聚焦到小子集上去。

定义 2:合成准则。
当 $k \neq 1$ 时,对所有 $A_i \cap B_j \neq \emptyset (A_i \subseteq \Theta, B_j \subseteq \Theta)$, 则

$$m(A_i \cap B_j) = m_1(A_i) m_2(B_j) \frac{\lambda}{1 - k}$$
$$m(A_i) = m_1(A_i) m_2(B_j) \frac{1 - \lambda}{1 - k} \frac{m_1(A_i)}{m_1(A_i) + m_2(B_j)}$$
$$m(B_j) = m_1(A_i) m_2(B_j) \frac{1 - \lambda}{1 - k} \frac{m_2(B_j)}{m_1(A_i) + m_2(B_j)}$$

当 $k = 1$ 时, $m(A \cup B) = m_1(A) m_2(B)$ 。
改进的目的就是要防止大的子集(携带确定性信息不多)上的信度分配聚焦到小的子集(携带更确定的信息)上,同时通过比例因子决定保留在原有焦元上的信度。利用上述改进公式计算出的结果 $m(\cdot)$ 对属于同一集合的 $m(\cdot)$ 应予以合并。

2.3 诊断实例

以电力变压器故障诊断为例,利用专家系统产生如图 2 所示的规则库。以其为具体辨识框架 Θ ,子

集 $2^\Theta = \{\{a\}, \{b\}, \{c\}, \{d\}, \{a, b\}, \{b, c, d\}\}$ 。由于变压器铁芯铁轭螺杆接地故障直接原因可能是对地绝缘电阻太低和气体继电器动作,所以这里用 $\{a, b\}$ 表示铁芯铁轭螺杆接地;类似地,用 $\{b, c, d\}$ 表示变压器铁芯局部短路过热。

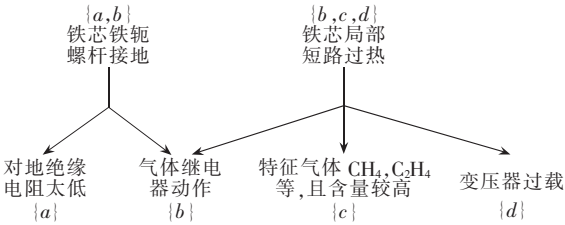


图 2 变压器故障诊断规则

Fig.2 Transformer diagnosis rules

假设采集到的证据及信度分配如表 1 所示。

表 1 证据样本以及信度分配

Tab.1 Evidence samples and belief distribution

证据	焦 元					
	$\{a\}$	$\{b\}$	$\{c\}$	$\{d\}$	$\{a, b\}$	$\{b, c, d\}$
m_1	1.0					
m_2		1.0				
m_3			0.8	0.2		
m_4					1.0	
m_5						1.0

表中列出了几个典型证据,证据 1 完全支持“对地绝缘电阻太低”;证据 2 完全支持“气体继电器动作”;证据 3 对于两种可能诱因给予不同程度的支持等。利用常规 D-S 证据决策合成证据 m_1 与 m_2 时因为规约系数 $k \rightarrow \infty$ 无法继续,在处理其他证据组合上也显得不是很令人满意,表 2 是利用改进后的 D-S 证据合成准则对证据进行组合后的结果。

表 2 证据组合结果

Tab.2 Combination results of evidences

组合	焦 元					
	$\{a\}$	$\{b\}$	$\{c\}$	$\{d\}$	$\{a, b\}$	$\{b, c, d\}$
$m_1 \oplus m_2$					1.000	
$m_2 \oplus m_4$		0.750			0.250	
$m_3 \oplus m_3$			0.941	0.059		
$m_2 \oplus m_5$		0.667				0.333

分析证据组合结果:证据 1 与证据 2 本是完全相悖的两个证据,其绝对冲突性使得原来 D-S 证据决策失效,这在前面的问题中已经叙述过, m_1 强支持“变压器对地绝缘电阻太低”, m_2 强支持“气体继电器动作”,应用改进后的 D-S 合成准则, $m_1 \oplus m_2$ 对子集 $\{a, b\}$ 的支持度变为 100 %,过程中未发生冲突但具有现实意义,因为两条证据的直接作用会导致“变压器铁芯铁轭螺杆接地”完全在情理之中;对于 $m_2 \oplus m_4$,由于证据 2 与证据 4 是相容性冲突,经处理之后,对大子集 $\{a, b\}$ 的支持度跌落得比小子集 $\{b\}$ 的支持度要大,这是相对聚焦的结果,再跟 $m_2 \oplus m_5$

作比较,显然证据5对于 b 的支持度要比证据4对于 b 的支持度弱(因为证据5的子集基数要比证据4的子集基数大),组合后的结果也印证了这一点是合理的;至于 $m_3 \oplus m_3$,意味着两个同等支持度的证据,经过聚焦处理,原来信度分配大的子集 $\{c\}$ 进一步得到了增强。综上,经过改进后的D-S证据决策处理证据更理想,每个证据的信度分配经过聚焦处理后得到了更合理的分配,因此最终诊断也尤其具有说服力。如上述组合结论所示, $m_1 \oplus m_2$ 的诊断结论就是变压器铁芯铁轭螺杆接地。

3 结论

本文提出了一种基于改进D-S证据决策法则的电力系统故障诊断方法,这种方法可以较好地解决一般方法所不能解决的证据冲突问题,具有极高的容错能力,在单个证据出现误差或失效的情况下仍能进行比较有效的诊断,克服了“诊断阻塞”;经过信息融合,各个证据较好地实现了信息的互补,证据的权重也被聚焦到集合中更小的子集上,突出了故障征兆的共性信息,从而极大地提高了信息的利用率,减少了系统诊断的不确定性。

参考文献:

- [1] MOHAMED A H, ABDULLAH S A. ANN-based approach for fast fault diagnosis and alarm handling of power systems[A]. *Proceedings of 5th International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management*[C]. Hongkong: [s.n.], 2000. 54-58.
- [2] XIE Shao-feng, LI Qun-zhan. Applications of expert system based on mixed reasoning in traction substation fault diagnosis[A]. *Proceedings of the 2nd International Workshop on Autonomous Decentralized System*[C]. [s.l.]: [s.n.], 2002. 229-232.
- [3] LO K L, NG H S, GRANT D M, *et al.* Extended Petri net

models for fault diagnosis for substation automation[J]. *IEEE Proceedings-Generations, Transmissions and Distributions*, 1999, 146(3): 229-234.

- [4] 段新生. 证据决策[M]. 北京: 经济科学出版社, 1996.
- [5] 张山鹰, 潘 泉, 张洪才. 一种新的证据推理组合规则[J]. *控制与决策*, 2000, 15(5): 540-544.
ZHANG Shan-ying, PAN Quan, ZHANG Hong-cai. A new kind of combination rule of evidence theory[J]. *Control and Decision*, 2000, 15(5): 540-544.
- [6] 章 勇, 丁秋林. 一种新的证据合成法则[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2003, (3): 205-208.
ZHANG Yong, DING Qiu-lin. A new combination rules of evidence[J]. *Journal of Southeast University(Natural Science Edition)*, 2003, (3): 205-208.
- [7] 向 阳, 史习智. 证据理论合成规则的一点修正[J]. *上海交通大学学报*, 1999, 33(3): 357-360.
XIANG Yang, SHI Xi-zhi. Modification on combination rules of evidence theory[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1999, 33(3): 357-360.
- [8] WANG Zhuang, HU Wei-dong, YU Wen-xian. A quick evidential classification algorithm based on k-nearest neighbor rule[A]. *Proceedings of Second International Conference on Machine Learning and Cybernetics*[C]. Xi'an, China: [s.n.], 2003. 3248-3252.

(责任编辑: 戴绪云)

作者简介:

徐青山(1979-), 男, 江苏姜堰人, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统运行控制与故障诊断(E-mail: xuqingshan@seu.edu.cn);

唐国庆(1937-), 男, 上海人, 教授, 博士研究生导师, 主要从事人工智能、电力电子在电力系统中的应用方面的研究;

成 勋(1977-), 男, 江苏宝应人, 助理工程师, 主要从事电厂运行方面的工作;

Tobias Mirbach(1978-), male, Germany, Diploma, Major in fault diagnosis in power systems.

Power system fault diagnosis based on improved D-S evidence decision rule

XU Qing-shan¹, TANG Guo-qing¹, CHENG Xun², Tobias Mirbach³

(1. Dept. of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. Shanghai Electrical Power Co., Ltd., Minghang Power Plant, Shanghai 200245, China;

3. Dept. of Electric Engineering, RWTH, Aachen 52064, Germany)

Abstract: Traditional fault diagnosis methods may cause problems, such as “diagnosis block” and “dimension calamity”. An improved D-S(Dempster-Shafer) decision method is presented to solve the defects of diagnosis information conflict or distemper. Focusing coefficient λ is introduced to combine the belief distribution in a more optimal way and eliminate the situation of no solutions on highly conflicting evidences. It is testified with a power transformer fault diagnosis. Results show that, with high capability of fault tolerance and prominence of common fault phenomena, the new method can improve information usability and decrease system diagnosis uncertainty.

Key words: power system; evidence decision; fault diagnosis; belief function