

文章编号:1000-582X(2010)12-001-07

应用模糊多属性理论的电力变压器故障融合诊断

杜林,袁蕾,王有元

(重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:大型油浸电力变压器的故障诊断一般通过预防性试验数据进行,预防性试验数据必须停电检修才能获取,且实际现场数据的采集精度及数量也都有限。变压器的征兆现象是大量经验的总结,在一定程度上可以反映变压器的故障。提出了在变压器故障诊断中将征兆现象和试验数据融合的思想,实现各种信息的优势互补。通过模糊多属性决策理论,实现对征兆现象的诊断;通过变压器绝缘故障诊断的模糊概率模型,实现对预防性试验的诊断;最后用 D-S 证据理论对预防性试验数据和征兆现象的诊断结果融合。建立了一种新的故障诊断模型,实例证明了此方法的有效性。

关键词:电力变压器;模糊多属性决策(FMADM);证据理论;信息融合;故障诊断

中图分类号:TM411

文献标志码:A

Power transformer fault fusion diagnosis using FMADM theory

DU Lin, YUAN Lei, WANG You-yuan

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: Large oil-immersed power transformer fault diagnosis is always directed at preventive test data, the preventive test data can not be got immediately, otherwise, it must be waited until power off and maintenance time. On the other hand, the accuracy and quantity for the field data collection is always limited. However, the symptoms phenomenon is a summary of a great deal experiences, to some extent, it can reflect the failure of transformer. Therefore, an idea that integrates both of the preventive test data and the symptom phenomenon in the transformer fault diagnosis is proposed. Through this method, all kinds of information can complement each other. First, the diagnosis to symptoms phenomenon is realized by introducing fuzzy multi-attribute decision making (FMADM) theory. Then, by adopting the fuzzy probability model, the failure probability of the preventive tests data is calculated. Finally, through D-S evidence theory, the results of the preventive test data and the symptom phenomenon can be integrated. The paper gives a novel diagnosis model which can be used as a kind of effective means through the given example.

Key words: power transformers; fuzzy multi-attribute decision-making (FMADM); evidence theory; information fusion; fault diagnosis

现代电力系统日趋复杂,电力设备的可靠性将直接关系到电力系统的安全运行。大型油浸电力变

压器是电力系统中最关键的设备之一,必须最大限度地防止和减少变压器故障和事故的发生^[1]。目

收稿日期:2010-06-27

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2009CB724504)

作者简介:杜林(1971-),男,重庆大学副教授,博士,主要从事电气设备在线监测及诊断技术研究,(Tel)023-65118222;
(E-mail) dulin@cqu.edu.cn。

前,国内外对变压器故障诊断方法主要是针对试验数据的诊断,比如基于油中溶解气体(DGA)的诊断方法,主要利用神经网络、专家系统、模糊理论、遗传算法等人工智能方法进行变压器故障诊断;或同时利用色谱数据和电气试验的综合诊断方法^[2-13]。比如,文献[10]利用多种类证据体,综合粗糙集、模糊聚类、神经网络和贝叶斯理论构造基本概率分配,建立基于几种典型预防性试验的故障综合诊断模型。文献[11]提出了多神经网络与证据理论融合的变压器故障综合诊断方法,利用3个神经网络分别对色谱数据和电气试验数据进行处理,将网络输出用证据理论合成,提高了诊断的准确性。文献[13]将油中溶解气体分析与常规电气试验结合,并借鉴现场运行、诊断和维修经验,利用BP神经网络和证据推理技术,建立了变压器综合诊断多级决策融合模型。然而,以上融合诊断方法,都是利用变压器的试验数据进行的。由于变压器故障的复杂性及运行环境的恶劣,实际现场数据采集精度及数量的有限性和数据获取的不及时,就使得以上方法在诊断能力、适用性方面还不尽人意。如油中气体含量不携带足够的故障部位信息;即使某些项目通过预防性试验测试,设备内部可能出现局部缺陷,如不采取措施,使局部缺陷在运行电压下不断发展,有可能留下事故隐患^[14]。

变压器运行中发生故障时,常伴有某些部件的外表颜色、气味、声音、油位等的变化,比如变压器运行时产生噪声,其故障原因可能是铁芯紧固件松动,或者是变压器过负荷运行,或者是变压器内部部件接触不良,或绝缘有击穿,或系统发生铁磁谐振等等,这些征兆现象和故障原因是大量运行经验的总结,反映了变压器的故障,是在变压器故障诊断中应该考虑的因素^[14]。笔者从对征兆现象和试验数据两方面的诊断出发,结合变压器实际运行情况,建立了一种新的变压器故障融合诊断模型。引入模糊多属性决策理论,通过浙江、广州某局收集的大量历史资料和近年来有关文献资料,整理了变压器的故障

模式及原因^[15-16],并分析得到了故障假设集及属性集,建立决策矩阵,用熵权法确定权值分配,用理想解法进行距离判断,得到征兆现象对应的故障^[17]。最后,用D-S证据理论对试验数据和征兆现象诊断结果融合,从而得出变压器的最终故障原因。

1 对征兆现象的故障诊断

1.1 模糊多属性(FMADM)决策的基本原理

多属性决策是现代决策科学的1个重要组成部分,在工程设计、经济、管理和军事等诸多领域都有广泛的理论与实际应用背景。其实质是利用已有的决策信息通过一定的方式对一组备选方案进行排序并择优,主要由决策信息的获取和决策2部分组成。

笔者采用的模糊多属性决策过程可以分为以下步骤^[19-20]:

- 1) 确定待评估方案 F (故障模式) 和评价指针 (属性), 通过专家评分将定性指标量化, 构造决策矩阵 $D = (x_{ij})_{m \times n}$ 。
- 2) 利用比例转化法对决策矩阵归一化处理。
- 3) 利用熵权法确定每个属性的权重, 并计算加权矩阵。
- 4) 使用理想解法计算各方案与正理想解和负理想解的距离。
- 5) 按距离对故障重新排序。

1.2 基于模糊多属性(FMADM)决策的故障诊断

1.2.1 确定变压器故障模式和属性集

使用多属性决策方法诊断设备故障时,选择电力变压器的颜色异常、声响异常、温度异常、油位异常作为模糊决策的属性集^[14-16]。采用浙江某电力局大量现场运行经验,通过整理研究,得到故障征兆集: $F = \{\text{绝缘老化, 绝缘受潮, 绕组变形并匝相间短路, 铁芯多点接地及局部短路, 放电故障, 结构体及磁屏蔽体中漏磁引起的过热, 有载分接开关箱渗漏油}\}$, 如表1所示。

表 1 变压器故障征兆集及属性集

	故障名称	特征参量属性集			
		颜色异常	声响异常	温度异常	油位异常
d_1	绝缘老化	变化		明显	
d_2	绝缘受潮	很明显			不明显
d_3	绕组变形并匝相间短路	不明显	明显	很明显	
d_4	铁芯多点接地及局部短路		明显	很明显	
d_5	悬浮放电		明显	变化	
d_6	结构体及磁屏蔽体中漏磁引起的过热			明显	
d_7	有载分接开关箱渗漏油				很明显

2.2.2 属性指针的量化与转换

语言类属性指针的量化通常有定量和定性两种不同的表示形式。为了便于对属性指针进行必要的数学处理,普遍采用 Mac-Crimmon 提出的二极比例方法(Bipolar Scaling)将定性指标转换为定量指

标^[19]。属性包括成本类属性和收益类属性,分别用数字 1,2,3,4,5 来表示 5 种变压器征兆参量的变化程度:“不变”、“不明显”、“变化”、“明显”、“很明显”。对每个属性的分类表如表 2 所示。

表 2 属性分类表

评价指标	指标等级				
	I 级 不变 1	II 级 不明显 2	III 级 变化 3	IV 级 明显 4	V 级 很明显 5
硅胶颜色变化	硅胶浅蓝色	硅胶轻微变色	硅胶一般变色,或有无色无味气体	硅胶严重变色,或有微黄色可燃气体	硅胶变成粉红色,或有黑灰色气体
运行中声响异常	器身发出轻微连续的“嗡嗡”声,为交流电磁声	“嗡嗡”响声较大而沉重,且响声均衡	“嗡嗡”响声时高时低,兼有“哇哇”或“咯咯”的间歇声	有粗细不匀的噪声,声音较大,且有“吱吱”声,或同时兼有以上声音	“噼啪”爆裂声,严重时将会有巨大轰鸣声,或同时兼有以上声音
运行中油温变化	不高于 85 ℃	85~95 ℃	95~100 ℃	100~105 ℃	大于 105 ℃
油位计、器身外观变化	油位,外观均正常	油位轻度变化	油位变化中等不正常,并有渗油现象	油位变化较严重,并有漏油现象	油位变化严重不正常,并有喷油现象

采用比例转化法对不同属性的数值作归一化处理^[20]。

$$x_{ij} = \frac{x_j^{\max} - x_{ij}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \text{ (成本类属性);} \quad (1)$$

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - x_j^{\min}}{x_j^{\max} - x_j^{\min}} \text{ (收益类属性)。} \quad (2)$$

1.2.3 利用熵权法确定各属性的权重

笔者采用熵权法来反映各特征量变化动态权重^[19]。

熵(entropy)的概念源于热力学,后来 C. E. Shannon 将其引入信息领域,赋予了熵广义的概念,即:熵是物质系统状态的一个函数,表示系统的紊乱程度,是系统的无序状态的量度。

熵权法是根据被评价对象的指标值构成的判断矩阵来确定指标权重的一种方法,具有较强的客观性,排出了专家意见等容易受主观因素影响的成分,能较好的反映个指标参量在模型中的重要程度。

在有 m 个被评价对象, n 个评价指标的评估问题中,第 j 个评价指标 p_{ij} 的熵定义为

$$E_j = -k \sum_{i=1}^m p_{ij} \cdot \ln(p_{ij}), \forall j, \quad (3)$$

其中: $E_j \geq 0$ 为第 j 个评价指标的熵; $k = \frac{1}{\ln m}$,

$k \geq 0$; $p_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}}$, $\forall i, j$; x_{ij} 为决策矩阵中的元素,

即第 i 种故障模式所对应的第 j 种评价指标的取值。

如果决策者没有其它理由偏重于某些或者某个特定的属性,则此种情况下第 j 种评价指标的熵权为

$$\omega_j = \frac{(1 - E_j)}{\sum_{j=1}^n (1 - E_j)}, \quad (4)$$

式中: E_j 为第 j 个评价指标的熵; n 为评价指标的个数。

1.2.4 使用理想解法进行距离判断

笔者使用 FMADM 的理想解法进行距离判断。理想解法的基本思想是指在理想解与负理想解之间寻求一个相对满意的答案。其中,理想解由每一属性中模糊指标值的极大值组成,而负理想解由每一属性中模糊指标值的极小值构成^[20]。

同时考虑理想解和负理想解二者作为参照基准,并采用 n 维欧几里得距离(Euclidean distance)来度量任意可行解 A_i 与理想解 A^+ 及负理想解 A^- 之间的差异,分别记作 d_i^+ 和 d_i^- ,然后把两个差异结合在一起计算可行解的总效用 $U(A_i)$,决策的原则是可行解的总效用越大越好。计算式为

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (5)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m. \quad (6)$$

$$U(A_i) = \frac{d_i^-}{(d_i^+ + d_i^-)}, i = 1, 2, \dots, m, \quad (7)$$

式中: $v_{ij} = \omega_j x'_{ij}$; $v_j^+ = \max_i \{v_{ij}\}$; $v_j^- = \min_i \{v_{ij}\}$ 。

2 对预防性试验数据的诊断

变压器的预防性试验包括:套管(套管电容量、 $\text{tg}\delta$ 管绝缘电阻、局部放电量)、铁芯(绝缘电阻、接地电流)、绕组(绝缘电阻、短路阻抗、直流电阻三相不平衡系数、 $\text{tg}\delta$ 、泄露电流、绕组变比偏差绝对值、吸收比和极化指数)、有载分接开关(油中微水含量、直流电阻、局部放电量)、本体绝缘油(局部放电量、 $\text{tg}\delta$ 、油中糠醛含量)等等。根据变压器的大量故障历史资料和变压器故障诊断专家意见,将预防性试验确定为:铁芯接地电流、绕组直流电阻的三相不平衡系数、本体油中含水量、绕组变比偏差绝对值、局部放电量、 CO/CO_2 、绕组的吸收比或极化指数。将油中溶解气体三比值编码分析成过热故障和放电故障特征。根据变压器绝缘故障诊断的模糊概率模型,在他人研究成果上进一步完善了征兆集、故障集、先验概率、故障与特征之间的因果强度,完成对预防性试验数据的诊断^[13]。

在参阅文献[6-13]和对故障变压器数据进行分析研究的基础上确定故障集为 $d_1 \sim d_9$: 铁芯多点接地及局部短路、绝缘老化、漏磁发热或磁屏蔽放电过热、绝缘受潮、分接开关事故及引线故障、悬浮放电、围屏放电、绕组变形并匝间短路。

采用半梯形隶属函数;根据规程 Q/CSG 1 0007-2004 分别确定特征参量的注意值;根据该注意值是属于上限值还是下限值确定隶属函数,如图 1 所示;对于特征参量同时具有 2 项或 2 项以上注意值的,分别构造隶属函数计算其隶属度,使用模糊操作数“V”(取大运算)求取该特征参量的隶属度。

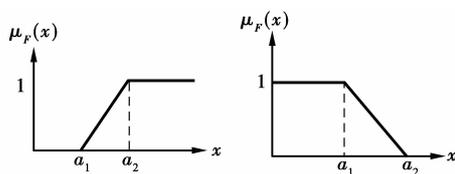


图 1 升、降半梯隶属函数

3 运用多源信息融合理论对预防性试验数据和征兆现象的融合诊断

因征兆现象诊断模块和试验数据诊断模块分别针对征兆现象和试验数据诊断变压器的故障,每种故障的正确识别精度也不一样,所以用 D-S 理论来对 2 种诊断结果融合,得到更精确的结果。^[11,21-23]

3.1 构造识别框架和证据体

选取试验数据诊断结果和征兆现象诊断结果的交集,作为诊断系统的识别框架。笔者提出的识别框架为:绝缘老化、绝缘受潮、绕组变形并匝相间短路、铁芯多点接地并局部短路、悬浮放电、结构体及磁屏蔽体中漏磁引起的过热。如果没有交集,各取两者概率最大者,不再进行融合。

将征兆现象诊断结果与试验数据诊断结果的输出作为独立的证据体。

3.2 确定各证据的基本概率分配函数

多源信息融合技术的实质就是在同一识别框架下,将不同的证据体合成为一个新的证据体的过程,基本概率分配函数的构造是关键。笔者将征兆现象诊断模块的正理想解距离和试验数据诊断模块的概率进行转换后作为识别框架上命题的基本概率分配。

在变压器故障诊断中,由于 2 种诊断方法对每种故障的识别精度不一样,所以两种诊断结果各存在 1 个可靠性系数 α ,它表示对某一证据体的信任程度。根据 2001 年到 2005 年广州某电力局主变设备缺陷统计分析和已有文献对色谱数据和电气试验数据进行综合诊断的经验,将试验数据诊断模块和征兆现象诊断模块的可靠性系数 α_1, α_2 分别取为 0.7 和 0.74,这是大量测试后对可靠性系数的经验取值,其科学的选取方法有待以后进一步研究。

设第 i 个诊断子模块的第 j 个故障概率是 $O_i(j)$,则该诊断模块对故障 j 的基本概率分配为

$$m_i(j) = \frac{O_i(j)\alpha_i}{\sum_{j=1}^l O_i(j)}, \quad (8)$$

$$m_i(\Theta) = 1 - \alpha_i. \quad (9)$$

式中: α_i 表示对第 i 个证据体的信任程度; $m_i(j)$ 表示第 i 个证据对第 j 个判断的信任度分配; $m_i(\Theta)$ 表示对第 i 个证据体的不确定性的信任度分配; l 表示第 i 个诊断模块的输出值个数,其中($i=1, 2$)。

3.3 证据的合成与决策

首先计算各证据对识别框架中所有命题的信度函数和似真度函数,然后利用 D-S 合成法则计算出不同证据联合作用下的信度函数和似真度函数。对于多个信度函数情况下的合成可以依次计算,最终证据与其合成次序无关。

得到证据对识别框架中所有命题的信度区间 $[Bel_j, Pl_j]$ 和证据的不确定性 $m_j(\Theta)$ 后,必须满足所定位的故障类型应具有最大的信度函数值,且大于不确定信度函数值。根据实际诊断情况,将要确定的故障类型与其它类型的信度函数值之差确定为大于

0.3,将不确定信度函数值的阈值确定为小于 0.26。

变压器故障诊断体系图如图 2 所示。

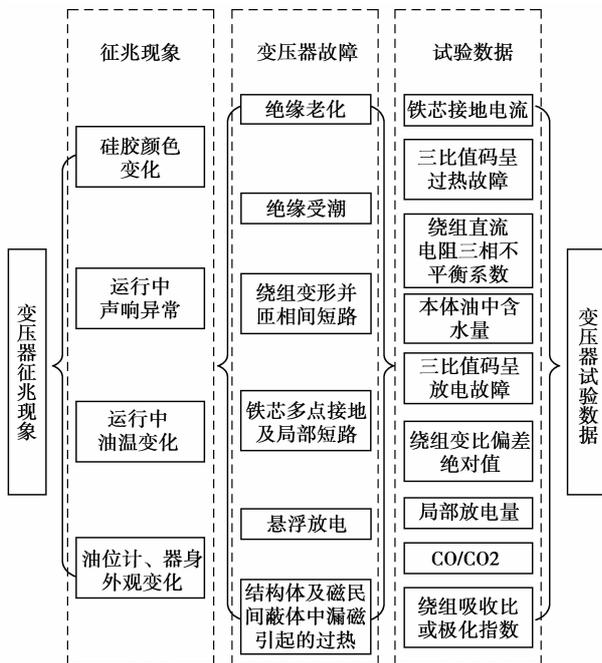


图 2 变压器故障诊断体系图

4 实例分析

某变电站 240 MVA, 220 kV 变压器, 型号为 SFPSZ1-240000/220, 2001 年、2002 年的预防性试验资料经整理如表 3 所示。

外观检查发现变压器有轻微渗漏油现象。附件存在的主要问题: 监测到绕组发热, 油温接近 100 °C, 分接开关操作时有明显的噪音与振动, 呼吸器不畅导致假油位。该变压器从 1989 年投运, 对 2002 年第二次试验数据诊断过程如下。

通过计算得三比值编码为 012, 根据 DL/T722-2000《导则》推荐的改良三比值法判断为电弧放电兼过热。

表 3 预防性试验数据

日期	试验项目				
	绕组直流电阻不平衡系数 * /%	局放量 /PC	绕组介损 /%	铁芯接地电流 /mA	油中含水量 /(mg · L ⁻¹)
2001	0.51	300	0.275	31	16
2002	0.55	800	0.59	37.4	21

(* : 为高、中、低压侧相间不平衡系数的最大值)

表 4 色谱追踪数据 (μL/L)

试验日期	CO	CO ₂	H ₂	CH ₄
2002. 5. 28	30.6	310	64	7.7
2002. 8. 9	197	711	92.1	28
试验日期	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₁ +C ₂
2002. 5. 28	1.1	10	2.5	21.3
2002. 8. 9	5.72	48	9.1	113.9

由于 $\varphi(C_2H_2)$ 、本体油中含水量、局部放电量超过注意值, 根据文献 [13], 可得 $\tilde{M}^+ = \frac{0.1}{m_4} + \frac{0.86 \cdot 0.83}{m_5 + m_7}$, $\tilde{M}^- = \frac{0.9}{m_4} + \frac{0.17}{m_7}$, 取 m_5, m_7 的非冗余覆盖集有 $\{d_1\}, \{d_3\}, \{d_4\}, \{d_6\}, \{d_7\}, \{d_8\}, \{d_9\}$, 对它们的似然度计算结果如下: $L(d_1) = 0.115, L(d_3) = 0.034, L(d_4) = 0.065, L(d_6) = 0.030, L(d_7) = 0.110, L(d_8) = 0.047, L(d_9) = 0.144$, 可能的故障排序为: {绕组变形并匝相间短路、铁芯多点接地及局部短路、悬浮放电、匝绝缘损伤并匝间短路、围屏放电、漏磁发热或磁屏蔽体中漏磁引起的过热、分接开关事故及引线故障}。对观测到的征兆现象根据表 1、2 进行专家评分如表 5。

表 5 征兆现象评分表

声响异常	温度异常	油位异常
明显	明显	变化
4	4	3

建立初始决策矩阵

$$D = \begin{bmatrix} 3 & 1 & 4 & 1 \\ 5 & 1 & 1 & 2 \\ 2 & 4 & 5 & 1 \\ 1 & 4 & 5 & 1 \\ 1 & 4 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 3 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 5 \\ 1 & 4 & 4 & 3 \end{bmatrix}$$

根据式(3)、(4)得到各个属性的权值为

$$\omega = [0.111 \quad 0.480 \quad 0.299 \quad 0.110]$$

加权矩阵为

$$\tilde{D} = \begin{bmatrix} 0.056 & 0.480 & 0.075 & 0.110 \\ 0 & 0.480 & 0.299 & 0.083 \\ 0.083 & 0 & 0 & 0.110 \\ 0.111 & 0 & 0 & 0.110 \\ 0.111 & 0 & 0.150 & 0.110 \\ 0.111 & 0.480 & 0.150 & 0.110 \\ 0.111 & 0.480 & 0.299 & 0 \\ 0.111 & 0 & 0.075 & 0.055 \end{bmatrix}$$

正理想解矩阵为

$$V_j^+ = [0.111 \quad 0.480 \quad 0.299 \quad 0.110].$$

负理想解矩阵为

$$V_j^- = [0 \quad 0 \quad 0 \quad 0].$$

确定方案与正、负理想解之间的距离为

$$d^+ = [0.231 \quad 0.114 \quad 0.566 \quad 0.565 \quad 0.503 \\ 0.150 \quad 0.110 \quad 0.533],$$

$$d^- = [0.501 \quad 0.571 \quad 0.138 \quad 0.156 \quad 0.216 \\ 0.526 \quad 0.576 \quad 0.145].$$

通过判断待判断故障样本与已知故障类型的欧式距离,即,正理想解距离最大者和负理想解距离最小者即为最相近故障。

由计算结果按故障欧式距离大小对故障假设集重新排序 $F = \{d_3, d_4, d_5, d_1, d_6, d_2, d_7\}$, 即 $F' = \{\text{绕组变形并匝相间短路、铁芯多点接地及局部短路、悬浮放电、绝缘老化、结构件及磁屏蔽体中漏磁引起过热、绝缘受潮、有载分接开关箱渗漏油}\}$ 。

通过以上分析发现前 3 种故障正理想解距离非常接近,且区分率不高,结合预防性试验数据的诊断结果,用 D-S 证据理论对以上 2 种诊断结果融合。构造识别框架为 $\{\text{绕组变形并匝相间短路 } F_1、\text{铁芯多点接地及局部短路 } F_2、\text{悬浮放电 } F_3\}$, 将数据诊断模块得到的概率值和征兆现象诊断模块得到的正理想解距离经式(8)预处理后,作为各自的证据体,计算各证据体单独作用及融合作用下,识别框架中各命题的信度区间,分别如表 6 和表 7 所示。

根据融合诊断决策规则,从表 8 可以看出,用 D-S 理论融合后,诊断结果较为明显,故障 F_1 具有最大的信度函数值,置信区间为 $[0.403, 0.404]$, 不确定性减小到 0.078, 融合后的信度值和信度区间有较好的峰值性和可分性,识别出变压器故障 F_1 , 即绕组变形并匝相间短路。吊罩检查发现, C 相高压绕组变形, C 相中压绕组严重变形, 并挤破围板造成中、低压绕组短路; C 相低压绕组被烧断二股, B 相低压、中压绕组严重变形, 与笔者的结论绕组变形并匝相间短路相吻合, 说明本文的方法能更准确的进行故障的分类识别, 诊断效果较单一数据诊断效果好。

表 6 各证据体的基本概率分配

证据	$m_i(\Theta)$	$m_i(F_j)$		
		F_1	F_2	F_3
故障征兆现象	0.26	0.256	0.255	0.228
预防性试验数据	0.3	0.273	0.218	0.209

表 7 单独作用的信度区间和诊断结果

证据	$m_i(\Theta)$	$[Bel(F_j), pl(F_j)]$			诊断结论	
		F_1	F_2	F_3		
故障征兆现象 A	0.26	<i>Bel</i>	0.256	0.255	0.228	未知
		<i>Pl</i>	0.517	0.516	0.489	
预防性试验数据 B	0.3	<i>Bel</i>	0.273	0.218	0.209	未知
		<i>Pl</i>	0.573	0.518	0.509	

表 8 融合作用的信度区间和诊断结果

证据	$m_i(\Theta)$	$[Bel(F_j), pl(F_j)]$			诊断结论	
		F_1	F_2	F_3		
A&B	0.078	<i>Bel</i>	0.403	0.321	0.275	F_1
		<i>Pl</i>	0.404	0.322	0.276	

5 结 论

1) 针对目前变压器故障融合诊断方法是针对色谱数据和电气试验数据, 笔者提出了一种融合试验数据和征兆现象的变压器故障诊断方法, 并应用 D-S 证据理论将 2 者诊断结果融合, 实现故障更准确的诊断。

2) 笔者引入了模糊多属性决策理论对征兆现象进行诊断。

3) 本诊断方法能充分利用变压器故障运行时的征兆现象和试验数据的互补、冗余信息, 对现场变压器故障的诊断和维修策略的制定具有现实意义。

参考文献:

- [1] 王昌长, 李福祺, 高胜友. 电力设备的在线监测与故障诊断[M]. 北京: 清华大学出版社, 2006.
- [2] SAMSUDIN R, RAMLI A Q, BERHANUDDIN A, et al. Field experience of transformer untanking to identify electrical faults and comparison with dissolved gas analysis [C/OL] // Energy and Environment. Proceedings of ICEE 2009 3rd International Conference on Energy and Environment, Malacca, Malaysia, December 7-8, 2009; [2010-01-22]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=5398629.
- [3] SCHWARZ R, MUHR M. Diagnostic methods for transformers [C/OL] Condition Monitoring and Diagnosis. International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, Beijing, China, April 21-24, 2008; [2008-07-29]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=4580445.

- [4] 孙才新,陈伟根,李俭,等. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M]. 北京:科学出版社,2003.
- [5] NARESH R, SHARMA V, VASHISTH M. An integrated neural fuzzy approach for fault diagnosis of transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4):2017-2024.
- [6] 钱政,严璋,罗承沐. 电力变压器绝缘故障综合诊断方法的研究[J]. 电网技术, 2002, 26(2):32-36.
QIAN ZHENG, YAN ZHANG, LUO CHENG-MU. Study on power transformer insulation fault integrated diagnosis method[J]. Power System Technology, 2002, 26(2):32-36.
- [7] SHINTEMIROV A, TANG W, WU Q H. Power transformer fault classification based on DGA by implementing bootstrap and genetic programming[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, Cybernetics, Part C: Applications and Reviews, 2009, 39(1):69-79.
- [8] MOFIZUL I S, WU T, LEDWICH G. A novel fuzzy logic approach to transformer fault diagnosis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2000, 7(2):177-186.
- [9] WANG Z, LIU Y, GRIFFIN P J. A combined ANN and expert system tool for transformer fault diagnosis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4):1224-1229.
- [10] 熊浩,杨俊,李卫国,等. 多种类证据体的变压器故障综合诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(28):24-30.
XIONG HAO, YANG JUN, LI WEI-GUO, et al. Application of evidence theory to transformer faults synthesized diagnosis [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(28):24-30.
- [11] 廖瑞金,廖玉祥,杨丽君,等. 多神经网络与证据理论融合的变压器综合故障诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(3):119-124.
LIAO RUI-JIN, LIAO YU-XIANG, YANG LI-JUN, et al. Study on Synthetic Diagnosis Method of Transformer Fault using Multi-neural Network and Evidence Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(3):119-124.
- [12] YANG H T, CHANG W Y, HUANG C L. On-line fault diagnosis of power substation using connectionist expert system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995, 10(1):323-331.
- [13] 杨莉,尚勇,周跃峰,等. 基于概率推理和模糊数学的变压器综合故障诊断模型[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(7):19-23.
YANG LI, SHANG-YONG, ZHOU YAO-FENG, et al. Probability reasoning and fuzzy technique applied for identifying power transformer malfunction [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(7):19-23.
- [14] SU Q, MI C. Fuzzy diagnosis of transformer and generator faults [C] // Proceedings of the Australian Power Engineering Conference, Melbourne: [s. n.], 1996:389-394.
- [15] TOMSOVIC K, TAPPER M, INGVARSSON T. A fuzzy information approach to integrating different transformer diagnostic methods[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1993, 8(3):1638-1646.
- [16] 董其国. 电力变压器故障与诊断[M]. 北京:中国电力出版社, 2007.
- [17] 王有元. 基于可靠和风险评估的电力变压器状态维修决策方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2008.
- [18] WU W, ISLAM S M, LEDWICH C. A hybrid intelligent system approach to transformer fault diagnosis [C] // Proceedings of the Australian Universities Power Engineering Conference, Sydney: [s. n.], 1997:43-48.
- [19] 吴振生,杨国安,贾军峰. 基于模糊多属性决策的旋转机械故障自动诊断系统[J]. 石油矿场机械, 2006, 35(5):4-8.
WU ZHEN-SHENG, YANG GUO-AN, JIA JUN-FENG. Fault auto-diagnosis system based on FMADM rotating machinery [J]. Oil Field Equipments, 2006, 35(5):4-8.
- [20] 李荣钧. 模糊多准则决策理论与应用[M]. 北京:科学出版社, 2002.
- [21] 杨露菁,余华. 多源信息融合理论与应用[M]. 北京:北京邮电出版社, 2006.
- [22] 廖玉祥. 一种电力变压器运行状态综合评估模型的研究[D]. 重庆:重庆大学, 2006.
- [23] WANG C C, DON H S. A geometrical approach to evidential reasoning [C/OL] // Systems, Man, and Cybernetics. IEEE International Conference on Decision Aiding for Complex Systems, Conference Proceedings, Charlottesville, VA, USA, October 13-16, 1991: [2002-08-06]. http://ieeexplore.ieee.org/xpls/abs_all.jsp?arnumber=169647.