

基于支持概率距离的变压器状态评估方法

针对传统证据理论在变压器状态评估中难于处理证据冲突,提出了一种基于支持概率距离的变压器状态评估方法。该方法通过求取每项变压器监测指标的支持概率距离,来确定指标之间的相互支持程度,并以此作为权重将初始变压器监测指标进行二次修正,最后将重新修正后的各项变压器监测指标进行融合得到变压器状态的综合评估结果。以变压器主绝缘评估实例的计算表明,此方法能够有效克服传统证据理论运用在变压器状态评估上的局限,能够得到更为准确、客观的综合评估结果。

李 菲 彭 鼎 杨 华/贵州电网有限责任公司铜仁供电局
邓 焱 魏长春/广州穗华能源科技有限公司

0 引言

变压器作为电力系统中最重要的一次设备之一,其检测和维护方法在很大程度上影响着电力系统智能化进程。传统的变压器检测采用的是定期停机检修的静态评估方式,而且需要花费大量的人力物力,在全面实行生产高效化、经济最大化和运行安全化的大环境下,这种方法已经不再适用于对变压器实时准确的监测和维护。因此,变压器在线监测、状态评估是电力系统中变压器运维管理的必然发展趋势。

变压器状态评估的监测量众多,其评估方法也多种多样,如何将变压器不同方面状态各种各样的监测数据进行有效的利用,从而建立一种合理的多信息融合的变压器状态评估模型,对提高变压器在线状态评估的准确性具有重要意义。

目前变压器状态评估的方法主要有Bayes网络^[1]、模糊证据理论^[2]、人工神经网络^[3]和可拓分析理论^[4]等方法。文献[5]利用了层次分析和模糊法的结果作为基本概率赋值,采用证据理论对不用特征量进行融合,得到变压器整体状态,虽然该文对冲突证据进行了处理,但并未解决证据理论融合容易产生冲突悖论的缺陷,其证据处理方法也有待商榷;文献[6]采用集对分析理论并结合专家经验对变压器状态进行综合评估,虽然方法可行性较高,但所采用的样本数据仅基于变压器油中溶解气体这一单一指标对变压器进行状态评估;文献[3]采用人工神经网络法进行评估,人工神经网络法需要大量的样本支持来训练神经网络,样本的数目和其评估的准确性都将大大影响整体的评估性能。

为了更全面、简洁且准确地进行变压器状态评估,本文在传统证据理论的基础上针对其固有的证据冲突问题进行改进,并把经过改进的证据理论应用到变压器状态评估中,建立如图1所示的变压器状态评估架构。首先确定变压器监测指标,并采用半梯形法将评估指标进行归一化;再通过改进层次分析法和熵权法来确定各项指标的主、客观权重并优化组合,从而能够在一定程度上消除专家在意见不一致时导致的权重分配错误;然后采用半梯形半岭隶属度函数法对各项证据进行基本概率分配;最后为了解决传统证据理论在证据冲突时的弊端,本文提出了一种基于支持概率距离的改进证据理论方法,通过对每项证



李 菲/助理工程师

关键词/Keywords

变压器·
状态评估·
支持概率距离·
改进证据D-S理论·

贵州电网有限责任公司科技项目(GZ2015-3-0016)。

据源的支持概率距离求取，并以此确定各项证据的相互支持程度。将得到的证据间支持度作为可信度对原证据源进行二次赋权，最后再进行证据融合得到变压器状态评估结果。

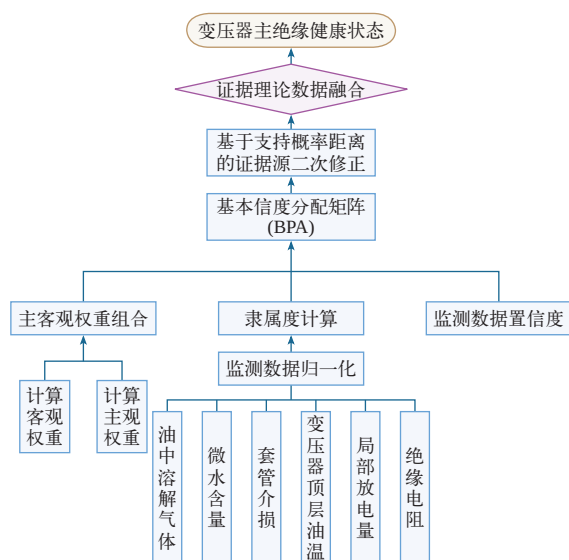


图1 变压器主绝缘状态评估架构

1 变压器状态评估体系架构

1.1 建立状态评估框架

变压器状态的劣化主要受电、热、主绝缘和机械形变这四个方面影响，而变压器的各种内部故障最终都将会以热性故障或电性故障表现出来。针对变压器主绝缘劣化问题，选取油中溶解气体分析、微水含量、套管介损、局部放电量、绝缘电阻和变压器顶层油温这六项在线监测量作为单项评估指标，能使得评估结果更具有时效性。文献[7]的标准，将变压器主绝缘状态以及各单项指标划为五个状态等级，即良好、正常、可疑、可靠性下降和危险。主绝缘状态等级与运维策略的关系如表1所示。

1.2 评估指标的证据量化

变压器状态监测指标的类型很多，这些信息又从不同方面、不同层次上反映了变压器的综合情况。在采用证据理论进行变压器状态综合评估时，直接采用上述数据十分不便，为了有效利用这些指标信息，需要将这些指标的测量数据进行

表1 状态等级与运维策略的关系

状态等级	状态描述及运维策略
良好	状态参量接近交接试验值或出厂值，并且连续数次试验的数据差别不大，相比同类设备偏好，可延期进行检修
正常	状态参量远未达到规程规定的注意值，没有明显劣化的趋势；相比同类设备偏好或相当。可以延期计划维修
可疑	状态参量介于最优（行业认可）与规程注意值之间；有劣化趋势但不明显；相比同类设备略偏差或相当。应优先安排维修
可靠性下降	状态参量接近规程规定的注意值，有劣化趋势；相比同类设备差异明显，尽快安排维修
危险	状态参量达到或超过注意值，或劣化趋势明显；相比同类设备有显著差异。建议立即安排维修

归一化处理。

对于各类变压器状态指标数据，其规程要求均为小于规定的注意值，则其量化公式如下

$$\mu_G = \begin{cases} 1 & X \leq 0.5X_0 \\ \frac{1.7X_0 - X}{1.2X_0} & 0.5X_0 \leq X \leq 1.7X_0 \\ 0 & X \geq 1.7X_0 \end{cases} \quad (1)$$

式中， X_0 为规程规定的注意值。

1.3 评估指标权重的确定

本文采用主客观组合权重^[8]来确定五项指标的权重值。在主观权重的确定上，采用改进的层次分析法（IAHP）确定各指标的权重^[9]，主观权重的计算式如下

$$\omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}} / \sum_{i=1}^n \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n r_{ij}} \quad i, j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

式中， ω_i 为第*i*项指标的主观权重； r_{ij} 为第*i*项指标相对于第*j*项指标的重要性程度。

指标权重的客观赋权采用熵权法^[10]，对于具有*n*个指标*m*组测量数据的矩阵 $D_{n \times m}$ ，对其中的数据进行标么化处理即可以得到 $S = (s_{ij})_{n \times m}$ ，其中， $s_{ij} = (\max d_{ij} - d_{ij}) / (\max d_{ij} - \min d_{ij})$ ， d_{ij} 为第*i*项指标第*j*个测量数据。第*i*项指标的熵值 $H_i = -(\ln m)^{-1} \sum_{j=1}^m p_{ij}$ 。

$\ln p_{ij}$ ， $i = 1, 2, \dots, n$ ， $p_{ij} = s_{ij} / \sum_{j=1}^m s_{ij}$ 。设 v_i 为第*i*项指标的客观权重，所以

$$v_i = \frac{1-H_i}{n - \sum_{i=1}^n H_i} \quad i=1,2,\dots,n \quad (3)$$

本文的主客观权重组合为 $W=[W_1, W_2, \dots, W_N]$, 其中

$$W_i = \alpha\omega_i + \beta v_i \quad i=1,2,\dots,n \quad (4)$$

式中, α 、 β 分别为主观权重和客观权重的重要度系数, 本文给其取值为 $\alpha=0.5815$, $\beta=0.4185$ ^[11]。

2 变压器状态指标隶属度确定

根据模糊数学理论, 一般认为指标不同状态等级的信息可用隶属度函数来描述, 例如梯形隶属度函数、三角隶属度函数等。考虑到梯形隶属度函数分布容易造成状态信息的丢失, 而三角隶属度函数在模拟转台的模糊性时比较粗略, 本文采用半梯形与半岭形相结合的隶属度函数^[12]来评估各指标。

隶属度函数定义如下

$$\begin{cases} f_k(x_{rm}) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{s_{k+1} - s_k} \left(x_{rm} - \frac{s_{k+1} + s_k}{2} \right) \right] & k=1,3,5,7 \\ f_k(x_{rm}) = \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \sin \left[\frac{\pi}{s_{k+1} - s_k} \left(x_{rm} - \frac{s_{k+1} + s_k}{2} \right) \right] & k=2,4,6,8 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} \mu_1(x_{rm}) = \begin{cases} 1 & x_{rm} < s_1 \\ f_1(x_{rm}) & s_1 \leq x_{rm} \leq s_2 \\ 0 & x_{rm} > s_2 \end{cases} \\ \mu_2(x_{rm}) = \begin{cases} f_2(x_{rm}) & s_1 \leq x_{rm} \leq s_2 \\ 1 & s_2 \leq x_{rm} \leq s_3 \\ f_3(x_{rm}) & s_3 \leq x_{rm} \leq s_4 \end{cases} \\ \mu_3(x_{rm}) = \begin{cases} f_4(x_{rm}) & s_3 \leq x_{rm} \leq s_4 \\ 1 & s_4 \leq x_{rm} \leq s_5 \\ f_5(x_{rm}) & s_5 \leq x_{rm} \leq s_6 \end{cases} \\ \mu_4(x_{rm}) = \begin{cases} f_6(x_{rm}) & s_5 \leq x_{rm} \leq s_6 \\ 1 & s_6 \leq x_{rm} \leq s_7 \\ f_7(x_{rm}) & s_7 \leq x_{rm} \leq s_8 \end{cases} \\ \mu_5(x_{rm}) = \begin{cases} 0 & x_{rm} < s_7 \\ f_8(x_{rm}) & s_7 \leq x_{rm} \leq s_8 \\ 1 & x_{rm} > s_8 \end{cases} \end{cases} \quad (6)$$

式中, $s_1=1/13$, $s_2=3/13$, $s_3=4/13$, $s_4=6/13$, $s_5=7/13$, $s_6=9/13$, $s_7=10/13$, $s_8=12/13$ 。根据上述公式对各变压器指标的归一化数据进行计算可得基本概率分配矩阵 $P(H)$ 为

$$P(H) = \begin{pmatrix} \mu_1(x_{r1}) & \mu_2(x_{r1}) & \cdots & \mu_5(x_{r1}) \\ \mu_1(x_{r2}) & \mu_2(x_{r2}) & \cdots & \mu_5(x_{r2}) \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \mu_1(x_{rm}) & \mu_2(x_{rm}) & \cdots & \mu_5(x_{rm}) \end{pmatrix} \quad (7)$$

式中, $\mu_n(x_{r1})$ 为第 $r1$ 个指标在第 n 个识别框架上的隶属度, 其中 n 取 $1 \sim 5$ 。

3 基于支持概率距离的改进证据融合方法

3.1 D-S证据理论

证据理论^[13]最先由Dempster提出, 随后经由其学生Shafer进一步完善和系统化, 因此被称为D-S证据理论, 它是一种不确定性推理和处理方法, 与概率推理等理论相比, D-S证据理论在不确定性的度量上更为灵活, 推理机制更为简洁, 尤其对于未知的处理更贴近于人的思维习惯。证据理论的核心超越了概率统计推断的理论框架, 可以适用于专家系统、人工智能、模式识别和系统决策等领域的实际问题, 并且很快发展成了智能学习和多元信息融合的重要组成部分。

当出现两个及以上的证据对同一子集或者两个交集不为空的子集分配信任度的时候, 会产生信任函数的组合, 即冗余信息的处理。D-S证据理论给出以下合成公式, 称为D-S合成规则, 来处理这一信任度分配的问题, 即

$$m(C) = \begin{cases} 0 & C = \emptyset \\ \frac{\sum_{A \cap B = C} m_1(A)m_1(B)}{1-k} & C \neq \emptyset \end{cases} \quad (8)$$

$$k = \left[\sum_{A \cap B = \emptyset} m_1(A)m_1(B) \right] = \left[1 - \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m_1(A)m_1(B) \right]$$

式中, k 为冲突系数, 用于描述证据信息的冲突程度, 当 $A \cap B = \emptyset$ 时, 证据A的信任函数和证据B的信任函数分别给两个不相容的命题赋予了信任

度,此时 $k \rightarrow \infty$,即证据A的信任函数和证据B的信任函数所对应的证据在这个问题上发生了冲突。 $m(C)$ 可记为 $m_1 \oplus m_2$,则对多个证据的结合为 $M = m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n$,可以从两个证据结合的情况推广得到。

3.2 基于支持概率距离的改进证据组合方法

考虑到证据理论应用于变压器状态综合评估时,其识别框架的设定决定了各变压器监测指标都是单点证据体。因此当各变压器监测指标相差较大时会出现高度证据冲突的情况,易产生D-S合成规则不能使用的情况或是得出与真实情况相悖的结论(例如1信任悖论、0信任悖论等)^[14]。

证据体之间出现的冲突可以用距离函数来表达,证据体之间的距离越小,表明冲突就越小,反之,表明冲突越大。因此,分析证据悖论问题和衡量证据体之间的距离是解决证据冲突的基础。

本文提出了基于支持概率距离的改进证据理论合成方法,其支持概率函数(Supporting Probability Function of Evidence, SPFE)定义如下,设有识别框架 $\Theta = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$, $m(A)$ 为在识别框架上各焦元的基本概率分配函数,焦元 x_i 在识别框架 Θ 下的支持概率函数 $SPFE_m: \Theta \rightarrow [0,1]$ 为

$$SPFE_m(\{x_i\}) = \sum_{x_i \in A} m(A), A \subseteq \Theta \quad (9)$$

定义支持概率距离函数的概念如下:设有在同一识别框架 Θ 下的两个证据体 E_1, E_2 ,用 m_1, m_2 表示其相应的基本概率分配函数,则相应的支持概率函数分别为 $SPFE_{m_1}$ 和 $SPFE_{m_2}$,两个证据体之间的支持概率距离表示为

$$\text{difSPFE}_{m_2}^{m_1} = \max_{A \subseteq \Theta} |SPFE_{m_1}(A) - SPFE_{m_2}(A)| \quad (10)$$

式中, $|SPFE_{m_1}(A) - SPFE_{m_2}(A)|$ 为焦元A的支持概率函数值在两个证据体中差值的绝对值,显然 $\text{difSPFE}_{m_2}^{m_1} = \text{difSPFE}_{m_1}^{m_2}$, $0 \leq \text{difSPFE}_{m_2}^{m_1} \leq 1$ 。支持概率距离越大,证据体之间的冲突越大,则证据体之间的相似性越小;相反,支持概率距离越小,证据体之间的冲突越小,则相似性越大。基于支持概率距离的改进证据组合方法流程如下所述。

3.2.1 计算证据体之间的支持概率距离

根据式(8)和式(9)来计算证据体之间的支持概率距离 $\text{difSPFE}_{m_2}^{m_1}$ 。基于支持概率距离的证据组合流程如图2所示。

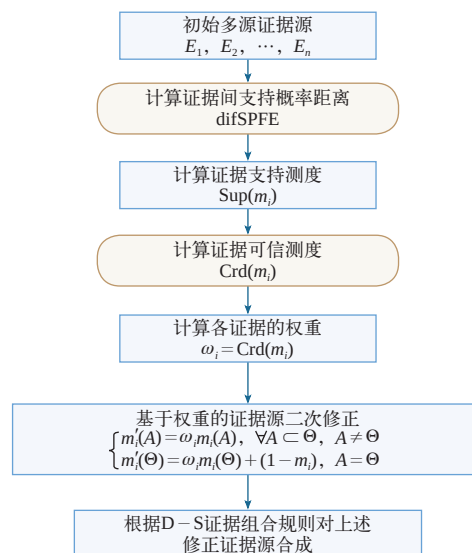


图2 基于支持概率距离的证据组合流程图

3.2.2 确立证据体之间的相似性测度函数

定义同一识别框架 Θ 下的 n 个证据体,任意两个证据体之间的支持概率距离表示为 $\text{difSPFE}_{m_2}^{m_1}$,则证据体之间的相似性测度表示为

$$S_{im}(m_1, m_2) = 1 - \text{difSPFE}_{m_2}^{m_1} \quad (11)$$

由此可得相似性测度矩阵,其形式如下

$$S_{im} = \begin{pmatrix} 1 & 1 - \text{difSPFE}_{m_1}^{m_2} & \dots & 1 - \text{difSPFE}_{m_1}^{m_n} \\ 1 - \text{difSPFE}_{m_2}^{m_1} & 1 & \dots & 1 - \text{difSPFE}_{m_2}^{m_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 1 - \text{difSPFE}_{m_n}^{m_1} & 1 - \text{difSPFE}_{m_n}^{m_2} & \dots & 1 \end{pmatrix} \quad (12)$$

3.2.3 求出各个证据体的支持测度函数

将相似性测度矩阵 S_{im} 中的每行相加可以得到证据体 E_i 的支持测度 $S_{up}(m_i)$

$$S_{up}(m_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^n S_{im}(m_i, m_j) \quad (13)$$

式中, $S_{up}(m_i)$ 为该证据体被其他证据体所支持的程度。当某一证据体与其他证据体很相似时,其支持测度就会很高。

3.2.4 计算证据体可信测度函数

证据体可信度函数为

$$\begin{aligned} \text{Crd}(m_i) &= \frac{S_{\text{up}}(m_i)}{\max_{1 \leq j \leq n} S_{\text{up}}(m_j)} \\ &= \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n (1 - \text{difSPFE}_{m_i}^{m_j})}{\max_{1 \leq j \leq n} \{S_{\text{up}}(m_j) | S_{\text{up}}(m_j) = \sum_{j=1, j \neq i}^n (1 - \text{difSPFE}_{m_i}^{m_j})\}} \end{aligned} \quad (14)$$

式中, $\forall i, j \in [1, n]$, $\text{Crd}(m_i)$ 为第 i 个证据体被一个支持测度最大的证据体所支持的可信程度。这个可信测度将作为证据源的二次权重以修正初始证据源。

3.2.5 修正初始证据源

将3.2.4中所求得每个证据体的可信测度作为权重, 即 $\omega_i = \text{Crd}(m_i)$, 用其来对初始证据源进行二次赋权

$$\begin{cases} m'_i(A) = \omega_i m_i(A) & \forall A \subset \Theta, A \neq \Theta \\ m'_i(\Theta) = \omega_i m_i(\Theta) + (1 - \omega_i) & A = \Theta \end{cases} \quad (15)$$

式中, $\forall i, j \in [1, n]$, $m'_i(A)$ 为修正后的焦元 A 被赋予的新的基本概率分配值。

3.2.6 对修正后的证据源进行融合

运用经典Dempster合成规则对修正后的证据源进行合成, 即

$$m(C) = \begin{cases} 0 & C = \emptyset \\ \frac{\sum_{A \cap B = C} \prod_{i=1}^n m'_i(A_i)}{1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m'_i(A) m'_j(B)} & C \neq \emptyset, \forall A_i \subseteq \Theta \end{cases} \quad (16)$$

3.2.7 评估决策

对评估决策规则的设定: ①判定结果的评估等级应该有最大的基本概率分配值; ②判定结果的基本概率赋值与其他任何基本概率赋值的差值要小于某一阈值 ε_0 , 本文 ε_0 取 0.001; ③不确定性的基本概率赋值要小于某一设定的阈值 ε_1 , 阈值越小, 说明评估结果可信度越高, 在本文中 ε_1 取 0.07; ④不确定性的基本概率赋值要小于判定结果的基本概率赋值。

以上四则条件必须同时满足才能认为评估有效, 否则认为评估失效, 需要完善证据源或重新定义识别框架。

4 实例分析

选取铜仁某变电站^{1#}主变压器的监测数据进行变压器主绝缘状态评估。所取得的监测数据如表2所示。

表2 变压器油试验数据

检测项目	本次测量值	上次测量值	规程规定
氢气	11×10^{-6}	60×10^{-6}	$< 150 \times 10^{-6}$
一氧化碳	48×10^{-6}	74×10^{-6}	
二氧化碳	572×10^{-6}	290.6×10^{-6}	
甲烷	2.9×10^{-6}	0.7×10^{-6}	
乙烯	3×10^{-6}	1.8×10^{-6}	
乙烷	无	无	
乙炔	无	无	$< 5 \times 10^{-6}$
总烃	11×10^{-6}	11×10^{-6}	$< 150 \times 10^{-6}$
微水分析/(mg·L ⁻¹)	5	5	< 25
顶层油温/℃	69	82	< 100
绝缘电阻/MΩ	10 000	8 000	无明显变化
吸收比	1.2	1.3	> 1.3
介损(%)	0.7	0.61	< 0.8
泄漏电流/μA	10	11	无明显变化

根据表2试验数据, 按照图1状态评估架构对该变压器主绝缘健康状态进行评估: 首先, 按式(1)对所得监测数据进行归一化处理, 再将归一化数据进行隶属度计算得到基本概率分配矩阵如表3所示。

表3 七种变压器主绝缘监测指标数据的隶属度

检测项目	良好	正常	可疑	可靠性下降	危险
油中溶解气体	0.077 8	0.922 2	0	0	0
变压器顶层油温	1	0	0	0	0
套管介损	0	0	1	0	0
微水含量	0	0.952 4	0.047 6	0	0
绝缘电阻	0	0.241 7	0.758 3	0	0
局部放电量	1	0	0	0	0

基于IAHP法的主观权重计算: 建立变压器监测指标的判断矩阵 K , 判断矩阵 K 的一致性比例 $C_R = 0.009\ 8 < 0.1$, 满足一致性要求。求最大特征值 $\lambda_{\max} = 5.043\ 8$ 对应的特征向量并进行归一化

处理,得到变压器监测指标的主客观权重向量 $\omega_1=[0.205\ 8\ 0.371\ 0\ 0.125\ 7\ 0.114\ 3\ 0.098\ 9\ 0.084\ 3]$ 。

基于熵权法的客观权重计算:根据式(3)来计算客观权重 $\mathbf{v}=[0.257\ 0\ 0.204\ 1\ 0.101\ 3\ 0.110\ 5\ 0.138\ 9\ 0.188\ 2]$ 。最后根据式(4)计算出综合权重 $\mathbf{W}=[0.227\ 2\ 0.289\ 0\ 0.098\ 0\ 0.136\ 0\ 0.115\ 6\ 0.127\ 8]$ 。

确定置信度 $CF(X_i)$ 在本文中所有变压器监测指标的置信度均取0.9。计算基本概率分配,其计算公式如下

$$m_{i,f} = \begin{cases} W(X_i)\mu_{u_i}(X_i)CF(X_i) & i=1,2,\dots,M \\ 1-\sum_{j=1}^M m_{i,f} & i=1,2,\dots,N; j=M+1 \end{cases} \quad (17)$$

根据式(16)计算得出基本概率分配矩阵 $\mathbf{M}$ 为

$$\mathbf{M} = \begin{pmatrix} 0.0551 & 0.6526 & 0 & 0 & 0 & 0.2924 \\ 0.9000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.1000 \\ 0 & 0 & 0.3053 & 0 & 0 & 0.6947 \\ 0 & 0.4033 & 0.0202 & 0 & 0 & 0.5766 \\ 0 & 0.0870 & 0.2731 & 0 & 0 & 0.6399 \\ 0.3979 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0.6021 \end{pmatrix} \quad (18)$$

根据式(8)~式(15)对初始证据源(即基本概率分配矩阵 $\mathbf{M}$)进行修正和融合,同时采用传统D-S证据理论方法和Jousselme证据距离方法对初始证据源 $\mathbf{M}$ 进行融合,以便与本文方法进行对比。三种方法评价结果如表4和图3所示。

表4 三种证据融合方法的变压器状态评价结果对比

融合方法	概率分配计算结果					
	良好	正常	可疑	可靠性下降	危险	不确定
基于支持概率距离的融合方法	0.273 7	0.505 4	0.165 6	0	0	0.055 3
传统证据理论方法	0.717 8	0.200 7	0.043 1	0	0	0.038 3
基于Jousselme证据距离的融合方法	0.148 3	0.190 2	0.116 1	0	0	0.545 3

由图3证据融合结果可知,对于本文提出的基于支持概率距离的证据融合方法,决策评估规则可判定该变压器主绝缘状态评价为良,评价结果

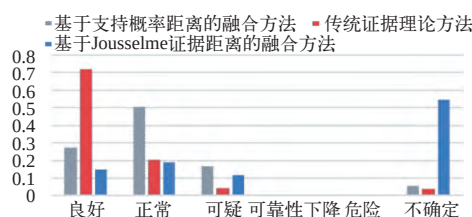


图3 三种证据融合方法的变压器状态评价结果对比

与维护人员在检修该变压器时现场评估的实际状态相符。

对于传统证据理论方法,根据决策评估规则所得出的变压器主绝缘状态评估为优,与实际评价结果有所出入,考虑可能是由于固有局限导致了“1悖论”问题。

基于Jousselme证据距离^[15-16]的融合方法由于不确定性过大,无法满足决策评估规则的要求,故认为此评价结果无效,初步分析认为是由于指标权重的差异较大导致在基本概率分配矩阵中的不确定度相对较大,而Jousselme法是一种加权平均分配的方法,因此在不确定度较大时无法得出理想的结果。

5 结束语

本文在对传统D-S证据理论融合方法研究的基础上,针对传统证据理论应用在变压器状态评估上存在的因为各监测证据冲突而产生的“0悖论”和“1悖论”等固有缺陷,提出了基于支持概率距离的变压器状态评估方法,通过对初始证据源的基本概率分配矩阵处理、二次赋权,充分考虑了证据体之间的相互关联性,降低了冲突证据体的可信度,有效地降低了该证据体对最终合成结果的影响,进而使合成结果更符合实际、收敛速度更快。

该方法不仅能克服传统证据理论在证据冲突时的“0悖论”和“1悖论”等固有缺陷,而且还能在各监测指标权重差距较大时,得出更客观的评估结果。

通过变压器算例与实际检修评估结果对比分析表明,本文提出的方法相对于其他两种方法更加客观、准确,证明了本文评估方法的有效、可靠。

参考文献

- [1] 赵文清, 朱永利, 姜波, 等. 基于贝叶斯网络的电力变压器状态评估 [J]. 高电压技术, 2008, 34 (5): 1032-1039.
- [2] Liao R, Zheng H, Grzybowski S, et al. An integrated decision-making model for condition assessment of power transformers using fuzzy approach and evidential reasoning [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26 (2): 1111-1118.
- [3] 阮羚, 谢齐家, 高胜友, 等. 人工神经网络和信息融合技术在变压器状态评估中的应用 [J]. 高电压技术, 2014, 40 (3).
- [4] 龙鹏, 盛戈崂, 刘亚东, 等. 基于可拓理论的变压器在线监测状态综合评估 [J]. 华东电力, 2011 (9): 1390-1394.
- [5] 廖瑞金, 王谦, 骆思佳, 等. 基于模糊综合评判的电力变压器运行状态评估模型 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32 (3): 70-75.
- [6] 廖瑞金, 孟繁津, 周年荣, 等. 基于集对分析和证据理论融合的变压器内绝缘状态评估方法 [J]. 高电压技术, 2014, 40 (2): 474-481.
- [7] 刘有为, 李光范, 高克利, 等. 制订《电气设备状态维修导则》的原则框架 [J]. 电网技术, 2003, 27 (6): 64-67.
- [8] 郝建, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 应用频域介电谱法的变压器油纸绝缘老化状态评估 [J]. 电网技术,

2011, 35 (7): 187-193.

- [9] 王吕长, 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.
- [10] 沈阳武, 彭晓涛, 施通勤, 等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法 [J]. 电力系统自动化, 2012, 36 (10): 67-73.
- [11] 熊以旺, 程浩忠, 王海群, 等. 基于改进AHP和概率统计的电能质量综合评估 [J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37 (13): 48-52.
- [12] 贾正源, 赵亮. 基于熵权未确知测度模型的电能质量综合评价 [J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38 (15): 33-37.
- [13] Chen W J, Jing Z R, Zhu A F, et al. Application of amendatory mathematical model of D-S evidence theory to data fusion [J]. American Fern Journal, 2009, 99 (2): 61-77.
- [14] 杨风暴, 王肖霞. D-S证据理论的冲突证据合成方法 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.
- [15] Jousselme A L, Grenier D, Éloi Bossé. A new distance between two bodies of evidence [J]. Information Fusion, 2001, 2 (2): 91-101.
- [16] Jousselme A L, Maupin P. Distances in evidence theory: Comprehensive survey and generalizations [J]. International Journal of Approximate Reasoning, 2012, 53 (2): 118-145.

(收稿日期: 2017-01-10) EA

(上接第75页)

- [20] Martin Glinka, Rainer Marquardt. A new AC/AC multilevel converter family [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 2005, 52 (3): 662-669.
- [21] 庞辉, 贺之渊, 赵岩, 等. 一种模块化多电平变流器的均压控制方法: 中国, CN102130619A [P]. 2011-07-20.
- [22] 徐政, 管敏渊. 模块化多电平换流器型直流输电系统的优化均压控制方法: 中国, CN101860203A [P]. 2010-10-13.

- [23] 邓焰, 彭浩, 王昆, 等. 一种模块化多电平变换器电容电压的均衡方法: 中国, CN104158419A [P]. 2014-11-19.
- [24] 王平, 楚遵方, 李子欣, 等. 一种模块化多电平变流器功率模块电容电压均压方法: 中国, CN102969922A [P]. 2013-03-13.
- [25] 陆翌, 王朝亮, 彭茂兰, 等. 一种模块化多电平换流器的子模块优化均压方法 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38 (3): 52-58.

(收稿日期: 2016-12-24) EA