

基于博弈论和改进D-S证据理论的变压器状态模糊综合评判方法

熊伟¹, 陈龙², 吕顺利², 郭振宇³, 路鑫¹

(1. 华北电力大学 计算机系, 河北 保定 071003;

2. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 210003;

3. 国网安徽省电力有限公司超高压分公司, 安徽 合肥 230041)

摘要:针对变压器状态评价指标复杂和评价过程过于依赖专家经验的问题,提出了一种基于博弈论和改进D-S证据理论的变压器状态模糊综合评判方法。首先,采用层次分析法和Critic方法分别计算指标的主客观权重,通过博弈论方法得到组合权重,克服传统权重方法过于依赖专家经验的问题。其次,使用云模型代替传统的隶属函数方法,保留了模糊评价中的不确定性。最后,通过改进D-S证据理论将项目层隶属度信息进行融合,消除D-S证据理论在高冲突证据融合时结果与常理相悖的现象。通过实例分析得出,该方法能够有效地评判变压器各状态转化概率。

关键词:电力变压器;多级模糊综合评判;Critic方法;博弈论;改进D-S证据理论

中图分类号:TM41 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd25484

A Fuzzy Comprehensive Judgment Method for Transformer State Based on Game Theory and Improved D-S Evidence Theory

XIONG Wei¹, CHEN Long², LÜ Shunli², GUO Zhenyu³, LU Xin¹

(1. Computer Department, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210003, Jiangsu, China;

3. State Grid Anhui Ultra High Voltage Company, Hefei 230041, Anhui, China)

Abstract: To address the complexities of transformer condition assessment indicators and the overreliance on expert judgment in the evaluation process, a novel method for fuzzy comprehensive assessment of transformer condition was introduced, which is based on gaming theory and an improved version of the D-S evidence theory. First, the analytic hierarchy process (AHP) and the Critic method was adopted to determine both the subjective and objective weights of the evaluation indicators. These weights are then combined using game theory, reducing the dependence on expert opinions in traditional weight determination methods. Second, instead of traditional membership functions, cloud models was employed to preserve the inherent uncertainty in fuzzy assessments. Finally, membership information at the project level was fused by using improved D-S evidence, eliminating paradoxical results that can occur when combining high-conflict evidence. Through the results of case studies, the method effectively assesses the transition probabilities of various transformer states.

Key words: power transformer; multilevel fuzzy comprehensive judgment; Critic method; game theory; improved D-S evidence theory

变压器作为电力系统的关键组件之一,其运行状态的好坏决定了电力系统的整体运行性能^[1]。因此,变压器状态的准确评估对于确保电

力系统的可靠性、稳定性以及效率至关重要。准确的变压器状态评估不仅可以延长变压器的使用寿命,降低设备维护成本,还能够及早识别潜

基金项目:国家电网有限公司总部管理科技项目(基于电网资源业务中台多模态数据的变压器状态感知与预测性运维技术研究与应用)(5700-202340289A-1-1-ZN)

作者简介:熊伟(1976—),男,博士,高级工程师,主要研究方向为深度学习、故障诊断,Email: xiongwei@ncepu.edu.cn

在的安全风险,从而提高电力系统整体的稳定性和运行效率。

鉴于变压器在电力系统中的关键作用和运行状态对整个系统的影响,近几年来许多致力于准确评估和监测变压器健康状态状况的论文被提出。杜江等人^[2]采用变权灰云模型对变压器状态进行评估,充分考虑信息的模糊性和随机性,但变权均衡系数的确定依赖于主观判断。夏彦卫等人^[3]提出了一种基于模糊评判与DSmT变压器绝缘状态评价方法,能够反映变压器的绝缘状态等级和绝缘缺陷风险趋势,但在融合指标隶属度时,忽略了确定概念的随机性。张梦瑶等人^[4]基于灰色物元处理变压器评估指标,实现对变压器状态的定性和定量评估,但在确定评价指标权重时结合两种客观权重方法,忽略专家经验。王骏等人^[5]提出了一种基于权重博弈论与证据理论相结合的变压器状态评价模型,在考虑专家的经验的大量历史客观数据前提下,使用博弈论得到的综合权重,能有效解决指标之间的冲突,但采用指派法确定变压器状态的隶属度,没有很好地考虑到运行状态的随机性。张冀等人^[6]建立了基于差异化阈值的变压器特征参量状态隶属函数,通过层次分析法和熵值法的博弈论加权计算不同运行状态的置信概率,但在计算指标权重时,忽略了指标之间的关联性,导致指标信息的重叠。周剑等人^[7]采用博弈论方法将层次分析法、变异系数法、组合赋权法得到的权重值进行博弈妥协处理,将最优指标值和最优权重值进行线性叠加得到变压器评价结果。张珂斐等人^[8]提出了一种基于最优权重和模糊综合分析法的变压器状态评价方法,结合层次分析法和熵权法计算指标权重,但在采用D-S证据理论融合证据信息时,没有考虑到高冲突证据融合相悖的问题。石宜金等人^[9]提出了一种改进D-S证据理论的变压器状态模糊综合评估方法,采用相关系数对证据源信息进行修正,但修正后不能保证证据信息的和值为1,且在衡量评价指标权重时仅使用层次分析法,过于依赖专家经验。此外,随着机器学习和深度学习的快速发展,一些学者开始在变压器状态评估领域探索并引入新的方法,包括支持向量机^[10]、集成学习^[11]、贝叶斯网络^[12]、深度信念网络^[13]以及深度神经网络^[14]等先进技术。然而,这些方法通常需要大规模的数据支持,对数据质量要求较高,导致难以应用到实际场景中。

针对以上方法的不足,本文提出一种基于合作博弈和改进D-S证据理论的变压器状态模糊综合评判方法。该方法综合了博弈论、云模型和改进的D-S证据理论的优点,能够有效评判变压器状态。

本文主要的改进点如下:使用博弈论结合主客观权重得到组合权重;采用相对劣化度和由云模型得到的隶属函数为变压器指标进行赋值;选择改进的D-S证据理论得到评判结果。

1 变压器评价指标体系

结合DL/T 1685-2017油浸式变压器(电抗器)状态评价导则,选取重要状态参量作为变压器状态评价指标,如图1所示。变压器状态评价体系由目标层、项目层、指标层构成。

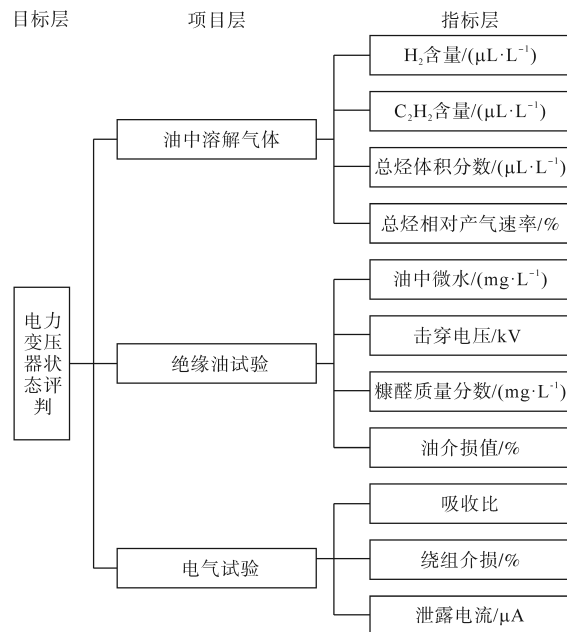


图1 变压器状态评价指标体系

Fig.1 Transformer condition assessment index system

本文电力变压器状态评判结果分为4个等级,即{正常,注意,异常,严重},对应的评语集表示为 $V=\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 。

2 研究方法

本节将介绍变压器状态评估过程的3个步骤。首先,结合专家经验采用层次分析法计算指标的主观权重,考虑到指标数据之间的关联性,使用Critic方法计算指标的客观权重,并利用博弈论的思想,找到二者的均衡点,形成主客观融合的组合权重。其次,采用相对劣化度消除指标本身性质、物理意义以及量纲的影响,采用云模

型来描述某一元素对于指定模糊集合的隶属度。最后通过改进D-S证据理论将隶属度信息进行融合,从而对变压器状态进行评判,评判过程流程如图2所示。

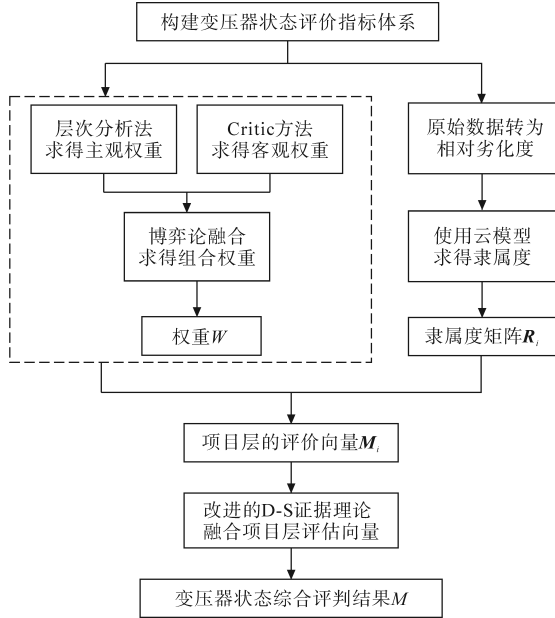


图2 变压器状态评判过程

Fig.2 Transformer condition assessment process

2.1 变压器指标组合权重

主观权重是指通过互相比对的方式确定各指标的相对重要性,专家打分来确定各个指标的权重,易受主观因素的影响。客观权重是指从实际的数据出发,忽略人为因素的干预,通过数学理论来获取各个指标的权重,缺乏专家经验在某些定性指标的作用。因此本文采用层次分析法和Critic方法分别计算图1中评价指标主观权重和客观权重,使用博弈论将专家经验与客观运行情况相结合,更加准确地反映变压器实际情况,权重融合过程如图3所示。

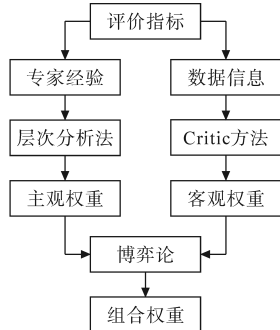


图3 权重融合过程

Fig.3 Weight fusion process

2.1.1 基于层次分析法计算主观权重

层次分析法是一项用来解决多目标、多层次

且难以完全用定量的方法去解决的主观赋权法^[15]。基于层次分析法计算主观权重的步骤如下:

1) 基于专家经验构造判断矩阵^[16]。专家根据给定的重要程度比较规则,如表1所示,对隶属于同一指标下的元素进行两两比较,构建判断矩阵。

表1 元素重要程度比较规则

Tab.1 Rules for comparing the importance of elements

因素1与因素2相比	量化值
同等重要	1
稍微重要	3
较强重要	5
强烈重要	7
极端重要	9
较弱重要	5
两相邻判断的中间值	2,4,6,8

2) 基于特征根法计算判断矩阵的特征值和特征向量。判断矩阵最大特征值对应的特征向量是该层元素的权重值。

3) 一致性检验。为保证矩阵各项关系保持逻辑上的合理通顺,避免出现不一致现象,需对判断矩阵进行一致性检验。需要满足一致性比例 $CR = CI/RI < 0.1$,则认为判断矩阵的一致性可以接受。其中,RI值由表2规定,CI计算如下式:

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

式中: λ_{\max} 为判断矩阵的最大特征值; n 为矩阵的阶数。

表2 平均随机一致性指标

Tab.2 Average random consistency index

阶数n	RI	阶数n	RI
1	0	6	1.26
2	0	7	1.36
3	0.52	8	1.41
4	0.89	9	1.46
5	1.12	10	1.49

2.1.2 基于Critic方法计算客观权重

Critic方法是一种基于数据对比强度和数据间冲突性的客观权重赋权法^[17]。基于Critic方法计算客观权重的步骤如下:

1) 构建 $m \times n$ 阶评价指标矩阵:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: m 为评价对象的个数; n 为评价指标的个数。

2)为了消除指标之间的量纲和取值范围的差异,对指标数据进行归一化处理。由于指标间的作用性质不同,将指标规划为正向指标和负向指标两大类^[18]。其中,正向指标代表评价对象的优良指标,其数值越大越好,使用下式对其归一化:

$$y_{ij} = \frac{x_{ij} - \min(x_j)}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (3)$$

式中: x_{ij} 为第*i*个评价对象的第*j*个评价指标值; x_j 为评价指标矩阵中第*j*列所有评价指标。

负向指标代表评价对象的劣质指标,其数值越小越好,使用下式对其归一化:

$$y_{ij} = \frac{\max(x_j) - x_{ij}}{\max(x_j) - \min(x_j)} \quad (4)$$

3)计算指标 I_j 的客观权重:

$$\mu_j = \frac{c_j}{\sum_{j=1}^n c_j} \quad (5)$$

其中

$$c_j = \sigma_j \sum_{h=1}^n (1 - \rho_{jh})$$

式中: c_j 为指标的信息量,信息量越大,该指标所占权重就越大; σ_j 为指标 I_j 的标准差; ρ_{jh} 为指标 I_j 与指标 I_h 的相关系数, I_h 为第*h*列指标,是除被计算权重的指标以外的任意指标。

2.1.3 基于博弈论进行组合赋权

为了避免单一权重计算方法的缺陷,同时排除常权法、变权法^[19]等得到组合权重方法过于依赖主观人为因素的影响。本文通过引入博弈组合赋权方法,结合主观权重和客观权重各自的优点,寻找最优权重。博弈组合赋权以博弈论的思想为基础,将主观权重和客观权重当作博弈参与者^[20],使组合权重与各方法所得权重的离差最小,从而双方达到一致或妥协^[21]。基于博弈论进行组合赋权的步骤如下:

1)设共有*m*种方法(本文*m*=2)对权重进行赋值,赋值所得权重向量计为 ω_i ,对不同方法所得权重向量 ω_i 进行任意线性组合,形成组合权重,得出的线性组合表达式为

$$\omega = \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot \omega_i^T \quad \beta_i > 0, \sum_{i=1}^m \beta_i = 1 \quad (6)$$

式中: β_i 为线性相关系数,也为权重系数。

2)为求得最优权重 ω^* ,以 ω_i 与 ω_j 离差最小化为目标,建立博弈对策模型为

$$\min \| \sum_{i=1}^m \beta_i \cdot \omega_i^T - \omega_j^T \|_2 \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (7)$$

3)求得权重系数 $(\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_i)$ 后,计算出组合权重:

$$\omega^* = \sum_{i=1}^m \beta_i^* \cdot \omega_i^T \quad (8)$$

其中

$$\beta_i = \frac{\beta_i}{\sum_{i=1}^m \beta_i}$$

式中: β_i^* 为对权重系数进行归一化处理的结果。

2.2 计算隶属度矩阵

2.2.1 相对劣化度

相对劣化度常用来衡量当前状态指标数值与标准数值相比的变化程度,它可以消除指标本身性质、物理意义以及量纲的影响^[22],取值区间在 $[0, 1]$ 之间。

对于取值越大越优秀的指标,其相对劣化度公式为

$$u_1(x) = \begin{cases} 1 & x < x_{\min} \\ \frac{x_{\max} - x}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 0 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (9)$$

对于取值越小越优秀的指标,其相对劣化度公式为

$$u_2(x) = \begin{cases} 0 & x < x_{\min} \\ \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} & x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 1 & x > x_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $u(x)$ 为相对劣化度; x 为评价指标当前数值; x_{\max}, x_{\min} 分别为评价指标的上、下限值。

2.2.2 确定隶属函数

隶属函数常用来描述某一元素对于指定模糊集合的隶属度,将该元素映射成 $[0, 1]$ 之间的实数,实数越大,则表示隶属度越高^[23]。确定隶属函数的常见方法包括模糊统计法、借用已有的客观尺度以及指派法^[24],在变压器的综合评价中,通常采用指派法,将已有的函数作为隶属函数,在指标数值和隶属度之间建立确定的映射。但实际的变压器系统在不同工况下性能特点可能发生变化,采用确定的映射关系可能使运行状态之间

转化的复杂性和随机性被忽略,导致评价结果过度简化。

为了克服以上问题,本文采用具有模糊性和不确定性特点的云模型,代替隶属函数计算隶属度,并定义模糊集合为{正常,注意,异常,严重},实现定性概念向具体数值的转换。

云模型包括期望、熵、超熵共3个数字特征。分别为:代表性概念的中间值 E_x 、用来反映定性概念的不确定性 E_n 、用来表示熵的不确定性 H_e 。云模型常用的是正态云发生器,分为正向云发生器和逆向云发生器。其中正向云发生器用来将定性概念转为具体数值,生成评价云滴。算法如下:生成随机数 E_n^* ,且 $E_n^* \sim N(E_n, H_e^2)$;生成随机数 x ,且 $x \sim N(E_x, E_n^2)$;求云滴 e 的位置 $[x, \mu(x)]$,其中 $\mu(x) = \exp[-(x - E_x)^2/2(E_n^*)^2]$ 。

在确定云模型所需的数字特征^[25]时,往往需要针对不同数据生成不同的云模型,所需数据量大,且步骤繁琐,本文基于文献[26]提出的云模型数字特征计算方法进行改进。设评判区间 C 的上、下阈值为 C_{\max} 和 C_{\min} ,使用评判区间上、下阈值的中间值代表 E_x ,即 $E_x = (C_{\max} + C_{\min})/2$;对于评判区间的临界值来说,它是一个模糊边界,应同时属于左、右两个区间,且隶属度相等,因此有 $\exp[-(x - E_x)^2/2(E_n^*)^2] = 0.5$,取 $x = C_{\max}$ 或 C_{\min} ,代入 $E_x = (C_{\max} + C_{\min})/2$,得 $E_n = (C_{\max} - C_{\min})/2.355$ 。 H_e 为 E_n 不确定性的度量,反映了系统的稳定度,其值越大,系统越不稳定。在考虑不确定性的同时,为了维持云模型的稳定,一般将 H_e 设置在0.001到0.01之间。本文将 H_e 设置为0.005。

变压器状态等级与评估指标的相对劣化度值的关系^[27]如表3所示。

表3 变压器状态与指标相对劣化度值的关系

Tab.3 Relationship between transformer condition and relative deterioration index values

变压器状态	相对劣化度
正常状态	0~0.2
注意状态	0.2~0.4
异常状态	0.4~0.7
严重状态	0.7~1.0

因此,各变压器状态等级所对应的云模型数字特征如表4所示,云模型如图4所示。在取指标相对劣化度对应的隶属度值时,对于不同状态等级的云模型,按照相对劣化度的升序对云滴进

行排序,取相对劣化度 u 周围共5个云滴的均值作为其隶属度值的值。

如图4的云模型图所示,当相对劣化度 $0 < u < 0.1$ 时,正常状态的隶属度不断增高;当相对劣化度 $u > 0.85$ 时,严重状态的隶属度开始下降,不符合现实情况。因此,定义 $0 < u < 0.1$ 时,正常状态的隶属度值为1, $u > 0.85$ 时,严重状态的隶属度值为1。由此可以得到修改后的云模型图如图5所示。

表4 云模型数字特征

Tab.4 Cloud model numerical features

变压器状态	云模型数字特征(E_x, E_n, H_e)
正常状态	(0.1, 0.085, 0.003)
注意状态	(0.3, 0.085, 0.003)
异常状态	(0.55, 0.127, 0.005)
严重状态	(0.85, 0.127, 0.005)

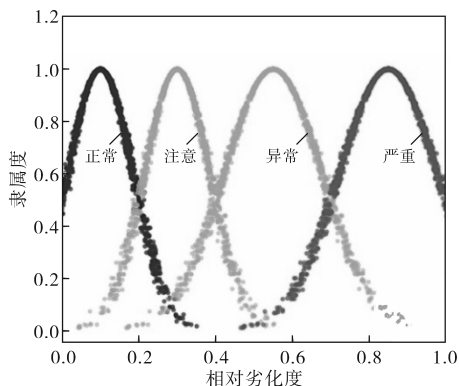


图4 变压器状态等级云模型

Fig.4 Transformer condition level cloud model

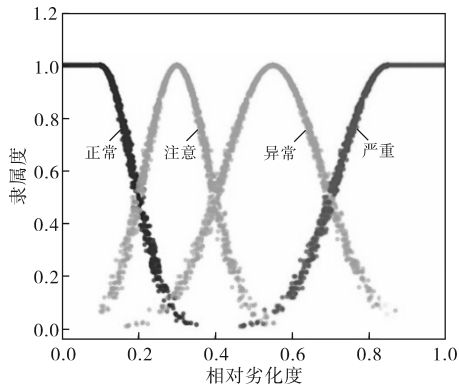


图5 修改后的云模型图

Fig.5 Modified cloud model diagram

2.3 改进D-S证据理论

D-S证据理论是一种有效的不确定性推理方法,其主要优势在于能够融合来自多个不同证据源的信息,以减少不确定性,从而生成更加可靠

的结论^[28]。这一理论目前在数据融合、决策分析等多个领域取得广泛应用^[29]。

D-S证据理论的一般规则为

$$m(A) = \frac{\sum_{A_i \cap A_j = A} \{m_1(A_i)m_2(A_j)\}}{1 - K} \quad (11)$$

其中

$$K = \sum_{A_i \cap A_j = \emptyset} \{m_1(A_i)m_2(A_j)\}$$

式中: $m_1(A_i), m_2(A_j)$ 分别为 A_i, A_j 的基本可信度函数。

在实际应用中,多个证据源提供的证据信息会有冲突,在对高冲突的证据信息进行融合后,所得到的结果往往与常理相悖。但绝大多数证据信息是可靠的,导致此问题的原因往往是个别证据信息异常^[30]。因此,本文基于皮尔逊相关系数对D-S证据理论进行改进,找出高冲突证据信息,并对其修正。假设共有 N 个证据源,证据信息的长度为 n ,具体步骤如下:

1)计算证据信息 m_i 与 m_j 之间的皮尔逊相关系数为

$$R_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^n [m_i(A_k) - \overline{m_i(A)}] [m_j(A_k) - \overline{m_j(A)}]}{\sqrt{\sum_{k=1}^n [m_i(A_k) - \overline{m_i(A)}]^2} \sqrt{\sum_{k=1}^n [m_j(A_k) - \overline{m_j(A)}]^2}} \quad (12)$$

R_{ij} 的范围为 $[-1, 1]$,其值越大,说明证据间的冲突性越小。为了避免计算平均相关度时,相关系数数值相互抵消,使 $R_{ij}^* = R_{ij} + 1$ 。

2)证据 m_i 与其他证据的平均相关度为

$$R_i^* = \frac{1}{N - 1} \sum_{j=1, i \neq j}^N R_{ij}^* \quad (13)$$

3)引入相对劣化度的思想对证据之间的冲突性进行衡量,由于平均相关度越大越好,因此定义证据冲突度为

$$\Delta_i = \frac{\max(R_i^*) - R_i^*}{\max(R_i^*) - \min(R_i^*)} \quad 1 \leq i \leq N \quad (14)$$

Δ_i 的范围为 $[0, 1]$,其值越大,说明证据 m_i 与其他证据的冲突性越高。

参数 τ 表示对高冲突证据的容忍度。当 $\tau = 0$ 时,只有证据信息之间完全正相关时,才不会被判定为高冲突证据;当 $\tau = 1$ 时,只有证据信息之间完全负相关时,才会被判定为高冲突证据。建议 τ 值设置在0.6到0.9之间。本文中 $\tau = 0.75$,当

$\Delta_i > \tau$,判定 m_i 为冲突证据。

4)定义证据 m_i 的可信度为

$$Crd_i = R_i^* / \sum_{i=1}^N R_i^* \quad (15)$$

5)为保证证据信息的和为1,增加证据信息 Θ ,非冲突证据的 Θ 值为0,将冲突证据 m_i 修改为

$$m'_i(A_k) = \begin{cases} Crd_i \cdot m_i(A_k) & A_k \neq \Theta \\ 1 - \sum_{k=1}^n Crd_i \cdot m_i(A_k) & A_k = \Theta \end{cases} \quad (16)$$

对证据信息经过上述操作后,再代入式(11)中进行信息融合操作。

2.4 变压器状态评判计算步骤

构建如图1所示的变压状态评价体系,并对其涉及的指标数据进行采集。

建立评语集 $V = \{v_1, v_2, v_3, v_4\}$,其中 v_1, v_2, v_3, v_4 分别代表变压器的正常状态、注意状态、异常状态和严重状态。

确定指标权重 W 。分别计算基于层次分析法的主观权重和基于Critic方法的客观权重,基于博弈论进行组合赋权,求得组合权重。

构建各层次模糊评判矩阵。将评价指标原始数据转为相对劣化度,再使用云模型求得对于4种状态的隶属度,从而得到评判矩阵 R_i 。

因为变压状态评价体系为多层结构,先求得项目层的评估向量 $M_i = W_i \times R_i$,再利用改进后的D-S证据理论对项目层的各个评估向量进行融合,最后求得目标层的评估向量 M ,取评估向量的最大分量作为状态评价结果。

3 实例分析及结论

3.1 实例1

为了验证本文方法的有效性,对文献[31]中所提到的某变电站110 kV一号主变的实验数据进行验证。

参考文献[31]中的主观权重 m_1 ,基于文献[32]中各台变压器的状态指标数据通过Critic方法计算客观权重 m_2 ,采用博弈论进行权重融合得到的组合权重 m ,如表5所示。并对油中溶解气体指标权重、电气试验指标权重、绝缘油试验指标权重分别归一化后得到 W_1 为 $[0.168\ 6, 0.288\ 6, 0.222\ 1, 0.320\ 7]$, W_2 为 $[0.231\ 1, 0.206\ 4, 0.337\ 8, 0.224\ 7]$, W_3 为 $[0.323\ 1, 0.45\ 2, 0.224\ 9]$ 。

表5 变压器评价指标权重

Tab.5 Transformer evaluation indicator weights

主观权重(m_1)	客观权重(m_2)	组合权重(m)
0.059 7	0.095 6	0.066 4
0.119 4	0.089 2	0.113 7
0.089 6	0.078 7	0.087 5
0.134 3	0.092 3	0.126 4
0.089 6	0.119 5	0.095 2
0.089 6	0.065 2	0.085 0
0.149 3	0.095 4	0.139 2
0.089 6	0.105 2	0.092 5
0.059 7	0.075 9	0.062 7
0.089 6	0.079 8	0.087 7
0.029 9	0.103 2	0.043 7

参考文献[31]中的指标相对劣化度 D 为 [0.17, 0.000 3, 0.48, 0.43, 0.768, 0.272 5, 0.23, 1.00, 0.40, 0.362 5, 0.375], 使用云模型将 D 转换为对于4种变压器状态的隶属度, 各指标的隶属度如表6所示。

表6 评价指标隶属度分布

Tab.6 Distribution of evaluation indicator memberships

指标	v_1	v_2	v_3	v_4
I_1	0.701 9	0.282 1	0.016 0	0
I_2	1	0	0	0
I_3	0	0.106 0	0.894 0	0
I_4	0	0.344 6	0.655 4	0
I_5	0	0	0.228 0	0.772 0
I_6	0.118 7	0.807 2	0.074 1	0
I_7	0.313 5	0.686 5	0	0
I_8	0	0	0	1
I_9	0	0.514 0	0.486 0	0
I_{10}	0	0.697 2	0.302 8	0
I_{11}	0	0.628 0	0.372 0	0

表6中评价指标隶属度数据按照所属项目不同, 可得评判矩阵 $R_1=[I_1, I_2, I_3, I_4]^T$, $R_2=[I_5, I_6, I_7, I_8]^T$, $R_3=[I_9, I_{10}, I_{11}]^T$ 。

由 $M_i=W_i \times R_i$ 可得项目层隶属度 M_1, M_2, M_3 , 如表7所示。使用原D-S证据理论对 M_1, M_2, M_3 进行融合, 结果如表7所示。

表7 项目层隶属度

Tab.7 Project-level memberships

证据	v_1	v_2	v_3	v_4
M_1	0.407 0	0.181 6	0.411 4	0
M_2	0.130 4	0.398 5	0.068 0	0.403 1
M_3	0	0.622 4	0.377 6	0

经过式(12)~式(16)对 M_1, M_2, M_3 冲突性进行判断, 其中 M_1 为冲突性数据, 并将 M_1, M_2, M_3 修正为 M_1^*, M_2^*, M_3^* , 如表8所示。

表8 修正后的证据基本概率

Tab.8 Revised basic probability of evidence

证据	$m(\Theta)$	v_1	v_2	v_3	v_4
M_1^*	0.701 2	0.121 6	0.054 3	0.122 9	0
M_2^*	0	0.130 4	0.398 5	0.068 0	0.403 1
M_3^*	0	0	0.622 4	0.377 6	0

使用式(11)对 M_1^*, M_2^*, M_3^* 进行数据融合, 结果为 [0, 0, 0.898 6, 0.101 4, 0], 因此判定变压器状态为注意, 相较于文献[31]中的结果 [0.194 0, 0.575 9, 0.113 2, 0.117 0], 本文结果更加确切。

3.2 实例2

为了更好地验证本文方法的有效性, 从安徽某地区收集了50台550 kV变压器的在线数据和试验数据, 其中包括18台正常状态的变压器、15台注意状态的变压器、10台异常状态的变压器、7台严重状态的变压器。通过模糊综合评价法、文献[30]和本文方法对50台变压器状态进行评价, 评价结果如表9所示。

模糊综合评价法采用层次分析法确定指标权重, 使用岭型函数确定隶属度, 准确率为78%。

文献[30]采用最优权重和D-S证据理论对传统方法进行改进, 准确率为80%。

从表9可知, 采用本文方法得到的变压器状态评价结果中48台与实际状态一致。第15台和第28台变压器的状态评价结果与实际状态不同, 但是在评估向量中二者概率相近, 且评价结果更偏向较为严重的状态, 能够降低潜在的安全风险。通过以上分析, 本文方法的准确率为96%, 能够较好地对变压器状态进行评价。

本文提出了一种基于权重融合和信息融合的变压器状态模糊综合评判方法。采用博弈论的方法克服主客观权重各自的片面性, 使评价指标权重的确定更加合理; 使用云模型代替隶属函数计算隶属度, 兼顾模糊性和不确定性的优势; 采用皮尔逊相关系数改进的D-S证据理论, 解决高冲突证据信息融合结果与现实相悖的问题, 有效地提高变压器运行状态评判的准确率。

在后续的研究中, 将考虑把变压器的历史数据加入状态评价过程, 以增加证据源数量, 提高诊断精准度。

表9 变压器评价结果

Tab.9 Transformer evaluation results

变压器编号	v_1	v_2	v_3	v_4	实际状态	模糊综合评价法	文献[30]	本文方法
1	0.595 2	0.368 5	0.036 4	0	正常	注意	注意	正常
2	0.924 9	0	0.059 1	0.015 8	正常	正常	正常	正常
3	0.116	0.617 8	0.129 5	0.136 6	注意	注意	注意	注意
4	0.832 9	0.005	0.162 1	0	正常	正常	正常	正常
5	0.887 7	0.112 3	0	0	正常	正常	正常	正常
6	0.664 4	0.005 1	0.329 2	0.001 1	正常	正常	正常	正常
7	0.968 2	0	0.031 3	0	正常	正常	正常	正常
8	1.000 2	0	0	0	正常	正常	正常	正常
9	0	0	0.913 4	0.086 6	异常	异常	异常	异常
10	0.032 7	0.760 1	0.115 7	0.091 5	注意	注意	注意	注意
11	0	0	0	1	严重	严重	严重	严重
12	0.264 2	0.555 4	0.077 2	0.103 2	注意	注意	注意	注意
13	0	0.001 7	0.925 2	0.073 3	异常	异常	异常	异常
14	0.847 5	0.037 5	0.115	0	正常	正常	正常	正常
15	0.469 6	0.512 7	0.017 7	0	正常	注意	注意	注意
16	0.252 3	0.014 7	0.035 9	0.697 7	严重	异常	正常	严重
17	0.941 5	0	0.058 9	0	正常	正常	正常	正常
18	0.061 6	0.024 8	0.730 2	0.183 4	异常	异常	异常	异常
19	0	0	1	0	异常	异常	异常	异常
20	0	0.302 9	0.697 1	0	异常	注意	注意	异常
21	0.520 2	0.172 5	0.307 3	0	正常	注意	注意	正常
22	0.233 1	0.547 4	0.092 4	0.127 1	注意	注意	注意	注意
23	0.026 1	0	0.008 1	0.965 9	严重	严重	严重	严重
24	0.023 6	0.507	0.055 9	0.413 5	注意	注意	注意	注意
25	0.140 8	0.851 6	0.007 9	0	注意	注意	注意	注意
26	0.950 1	0.041 2	0.008 6	0	正常	正常	正常	正常
27	1	0	0	0	正常	正常	正常	正常
28	0	0.009 4	0.474 8	0.515 8	异常	异常	异常	严重
29	0.714 6	0.073	0.211 3	0	正常	正常	注意	正常
30	0.440 1	0.149 3	0.410 5	0	正常	注意	注意	正常
31	0.168 1	0.476 1	0.110 5	0.245 3	注意	注意	注意	注意
32	0	0	0	1	严重	严重	严重	严重
33	0.819 2	0.180 8	0	0	正常	注意	正常	正常
34	0	0	0.949 7	0.050 3	异常	异常	异常	异常
35	0.667 9	0.167 8	0.164 6	0	正常	正常	正常	正常
36	0.275 7	0.359	0.362 1	0.003 3	异常	注意	注意	异常
37	0.717 6	0.282 8	0	0	正常	正常	正常	正常
38	0.999 8	0	0	0	正常	正常	正常	正常
39	0.113 5	0.497 4	0.104	0.285	注意	注意	注意	注意
40	0.358 9	0	0.010 8	0.630 4	严重	正常	正常	严重
41	0.157 2	0.498 7	0.217 5	0.126 6	注意	异常	异常	注意
42	0.009 5	0.840 4	0.044 4	0.105 8	注意	注意	注意	注意
43	0.098 5	0	0.000 5	0.901	严重	严重	严重	严重
44	0	0	0.770 9	0.229 1	异常	注意	异常	异常
45	0.019 3	0.875 2	0.006 9	0.098 6	注意	注意	注意	注意
46	0	0	0.998 4	0.001 6	异常	异常	异常	异常
47	0.023 2	0.502 4	0.069 8	0.404 6	注意	注意	注意	注意
48	0.806 5	0.091 3	0.102 2	0	正常	正常	正常	正常
49	0.696	0.005 8	0.298 5	0	正常	正常	正常	正常
50	0	0	0.031 2	0.968 8	严重	严重	严重	严重

参考文献

- [1] 吴国强,姚建锋,管敏渊,等.基于DBSCAN的电力变压器故障诊断[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(12):1172-1179.
WU Guoqiang, YAO Jianfeng, GUAN Minyuan, et al. Fault diagnosis of power transformer based on DBSCAN[J]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2021, 54(12):1172-1179.
- [2] 杜江,孙铭阳.基于变权灰色模型的变压器状态层次评估方法[J].电工技术学报,2020,35(20):4306-4316.
DU Jiang, SUN Mingyang. Hierarchical assessment method of transformer condition based on weight-varying grey cloud model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(20):4306-4316.
- [3] 夏彦卫,赵军,付浩川,等.基于模糊评判与DSmT的变压器本体多级绝缘状态评估方法[J].高压电器,2022,58(9):157-164.
XIA Yanwei, ZHAO Jun, FU Haochuan, et al. Multi-level insulation state assessment method of transformer proper based on fuzzy judgment and DSmT[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9):157-164.
- [4] 张梦瑶,李磊,刘彦文,等.基于灰色物元的变压器多指标绝缘状态评估方法[J].电力科学与技术学报,2020,35(1):137-143.
ZHANG Mengyao, LI Lei, LIU Yanwen, et al. Multiindices insulation condition assessment method for transformer based on grey matter element method[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1):137-143.
- [5] 王骏,郑重,周圆,等.变压器状态评价博弈式证据理论模型研究[J].华北电力大学学报(自然科学版),2018,45(5):43-51.
WANG Jun, ZHENG Chong, ZHOU Yuan, et al. Study on the weight gaming and modified evidence theory applied to the condition assessment of transformers[J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2018, 45(5):43-51.
- [6] 张冀,张亚静,仇向东.基于博弈组合赋权的变压器差异化状态评估[J].高压电器,2022,58(4):205-212.
ZHANG Ji, ZHANG Yajing, QIU Xiangdong. Differential state evaluation of transformer based on game combination weighting [J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(4):205-212.
- [7] 周剑,王鹏.基于博弈论和拟态物理学优化算法的变压器状态评价方法研究[J].陕西电力,2015,43(5):1-5,13.
ZHOU Jian, WANG Peng. Study on condition evaluation method for power transformers based on game theory and artificial physics optimization algorithm[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(5):1-5,13.
- [8] 张珂斐,郭江,曾兵,等.基于最优权重和模糊综合分析法的变压器状态评价方法研究[J].武汉大学学报(工学版),2021,54(6):563-570.
ZHANG Kefei, GUO Jiang, ZENG Bing, et al. Research on state evaluation method of transformer based on optimal weight and fuzzy comprehensive evaluation[J]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2021, 54(6):563-570.
- [9] 石宜金,谭贵生,赵波,等.基于模糊综合评估模型与信息融合的电力变压器状态评估方法[J].电力系统保护与控制,2022,50(21):167-176.
SHI Yijin, TAN Guisheng, ZHAO Bo, et al. Condition assessment method for power transformers based on fuzzy comprehensive evaluation and information fusion[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(21):167-176.
- [10] 李云淇,戚日常,张海强,等.基于改进灰狼算法与最小二乘支持向量机耦合的电力变压器故障诊断方法[J].电网技术,2023,47(4):1470-1478.
LI Yunhao, XIAN Richang, ZHANG Haiqiang, et al. Fault diagnosis for power transformers based on improved grey wolf algorithm coupled with least squares support vector machine[J]. Power System Technology, 2023, 47(4):1470-1478.
- [11] 韩笑,王新迎,韩帅,等.基于不平衡数据集集成学习的大型电力变压器状态评价方法[J].电网技术,2021,45(1):107-114.
HAN Xiao, WANG Xinying, HAN Shuai, et al. Ensemble learning method for large-scale power transformer status evaluation based on imbalanced data[J]. Power System Technology, 2021, 45(1):107-114.
- [12] 霍浩,马天龙,李宁瑞,等.基于贝叶斯与深度学习结合的变压器故障诊断[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(9):137-144.
HUO Hao, MA Tianlong, LI Ningrui, et al. Transformer fault diagnosis based on Bayesian method and deep learning[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2023, 35(9):137-144.
- [13] 苏磊,陈璐,徐鹏,等.基于深度信念网络的变压器运行状态分析[J].高压电器,2021,57(2):56-62.
SU Lei, CHEN Lu, XU Peng, et al. Operation condition analysis of transformer based on deep belief network[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2):56-62.
- [14] 周家玉,侯慧娟,盛戈峰,等.状态参量关联规则挖掘及深度学习融合的变压器故障诊断算法[J].高压电器,2023,59(3):108-115.
ZHOU Jiayu, HOU Huijuan, SHENG Gehao, et al. Transformer fault diagnosis algorithm based on association rules mining of state parameters and deep learning[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(3):108-115.
- [15] BAGI Y S, SUYONO S, TOMATALA M F. Decision support system for high achieving students selection using AHP and TOPSIS[C]//2020 2nd International Conference on Cybernetics and Intelligent System (ICORIS), 2020:1-5.
- [16] 刘宇轩,赵峰.城轨车辆辅助三相变压器健康状态评估[J].电气传动,2020,50(11):89-94.
LIU Yuxuan, ZHAO Feng. Health assessment of three-phase transformer aided by urban rail vehicle[J]. Electric Drive, 2020, 50(11):89-94.

- 2020, 50(11):89-94.
- [17] 吕志鹏,吴鸣,宋振浩,等. 电能质量CRITIC-TOPSIS综合评价方法[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(1):137-144.
LÜ Zhipeng, WU Ming, SONG Zhenhao, et al. Comprehensive evaluation of power quality on CRITIC-TOPSIS method[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(1):137-144.
- [18] ZHAO H, WANG Y, LIU X. The evaluation of smart city construction readiness in China using CRITIC-G1 method and the bonferroni operator[J]. IEEE Access, 2021(9):70024-70038.
- [19] 祝顺才,蔡金锭,王岭. 基于变权-模糊综合评判法的绝缘状态诊断研究[J]. 电气技术, 2017(4):16-21.
ZHU Shuncai, CAI Jinding, WANG Ling. Study on insulation condition diagnosis based on the variable weight-fuzzy comprehensive evaluation method[J]. Electrical Engineering, 2017(4):16-21.
- [20] JI Z, XU X, ZHANG D, et al. Transmission grid performance evaluation based on combinatorial game theory under dual carbon targets[C]//2022 Asian Conference on Frontiers of Power and Energy (ACFPE), 2022:371-375.
- [21] 程志友,刘荡荡,吴吉,等. 基于集对分析与可变模糊集的电能质量综合评估[J]. 电网技术, 2020, 44(5):1950-1956.
CHENG Zhiyou, LIU Dangdang, WU Ji, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on set pair analysis and variable fuzzy sets[J]. Power System Technology, 2020, 44(5):1950-1956.
- [22] 叶远波,黄太贵,谢民,等. 基于多模型融合集成学习的智能变电站二次设备状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(12):148-157.
YE Yuanbo, HUANG Taigui, XIE Min, et al. A state assessment method for intelligent substation secondary equipment based on multi-model ensemble learning[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(12):148-157.
- [23] XIE W B, ZHENG H, LI M Y, et al. Membership function-dependent local controller design for T-S fuzzy systems[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics Systems, 2022, 52(2):814-821.
- [24] 于晓辉,李越然,宋鹏彦,等. 极限状态模糊性对地震易损性分析的影响研究:以钢筋混凝土框架结构为例[J]. 工程力学, 2021, 38(9):89-99, 109.
YU Xiaohui, LI Yueran, SONG Pengyan, et al. Effect of fustiness at limit states on seismic fragility analysis: reinforced concrete frame cases[J]. Engineering Mechanics, 2021, 38(9):89-99, 109.
- [25] 盖志强,洪卫东,张华峰. 基于FIMD和Hilbert变换的线路行波故障诊断[J]. 电气传动, 2021, 51(24):16-21.
GAI Zhiqiang, HONG Weidong, ZHANG Huafeng. Fault diagnosis of line traveling wave based on FIMD and Hilbert transform[J]. Electric Drive, 2021, 51(24):16-21.
- [26] 贾琦,段春青,陈晓楠. 黄河流域水资源可再生能力评价的云模型[J]. 中国人口·资源与环境, 2010, 20(9):48-52.
JIA Qi, DUAN Chunqing, CHEN Xiaonan. A cloud model for the evaluation of water renewability in the yellow river basin[J]. China Population, Resources and Environment, 2010, 20(9):48-52.
- [27] 张懿议,廖瑞金,杨丽君,等. 基于云理论的电力变压器绝缘状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5):13-20.
ZHANG Yiyi, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. An assessment method for insulation condition of power transformer based upon cloud model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5):13-20.
- [28] 邢晓敏,徐海瑞,廖孟柯,等. 基于云模型和D-S证据理论的配电终端健康状态综合评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13):72-81.
XING Xiaomin, XU Hairui, LIAO Mengke, et al. Comprehensive evaluation method of distribution terminal units health status based on a cloud model and D-S evidence theory[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(13):72-81.
- [29] ZHANG W, SUN H, FANG W, et al. Trust evaluation and decision based on D-S evidence theory: early models and future perspectives[J]. IEEE Access, 2023, 11:16032-16041.
- [30] 张珂斐,郭江,肖志怀. 模糊综合评价和改进证据理论相融合的变压器状态评价方法研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2016, 49(2):279-284.
ZHANG Kefei, GUO Jiang, XIAO Zhihui. Research on state evaluation method of transformer based on fusion of fuzzy comprehensive evaluation and improved D-S evidence theory[J]. Engineering Journal of Wuhan University (Engineering Edition), 2016, 49(2):279-284.
- [31] 周秀,刘威峰,田天,等. 考虑历史工况的电力变压器健康状态评估模型[J]. 高压电器, 2021, 57(2):70-76.
ZHOU Xiu, LIU Weifeng, TIAN Tian, et al. Health condition assessment model of power transformer considering historical condition[J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(2):70-76.
- [32] 咸日常,范慧芳,张爱祥,等. 基于组合赋权与加权秩和比的电力变压器状态评估[J]. 高压电器, 2022, 58(12):199-206.
XIAN Richang, FAN Huifang, ZHANG Aixiang, et al. Status assessment of power transformer based on combined weighting and WRSR[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(12):199-206.

收稿日期:2023-11-13
修改稿日期:2023-12-31