

基于熵权层次法的油浸式变压器绝缘状态评价

李波, 张文乾, 刘维, 崔德智, 江军, 张潮海

(南京航空航天大学(江苏省新能源发电与电能变换重点实验室), 江苏 南京 211106)

摘要:为有效评估油浸式变压器的绝缘状态,文中提出一种综合主观专家经验和指标退化程度的熵权层次法。首先,基于油色谱、环境温度和缺陷信息等指标构建用于绝缘状态评价的层次结构,根据专家经验对各个指标进行主观权重分配;接着,采用组合权重的方法,在指标层权重分配上引入熵权权重,从而在保留专家经验对准则层判断的情况下,对底层权重进行动态调整,体现变压器运行过程中的差异性;然后,将变压器的绝缘状态从常见的4种扩展为5种,实现对绝缘状态更准确的感知;最后,4台500 kV变压器的实例分析表明,相较于仅采用主观权重或客观权重,文中提出的方法可以有效识别运行状态正常的变压器并甄别异常变压器。

关键词:绝缘状态;层次分析法;熵权法;组合权重;差异化评价;油浸式变压器

中图分类号:TM854

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2023)04-0223-08

0 引言

油浸式电力变压器是电力系统中最重要设备之一,对其进行有效的状态评价,及时发现并预防其潜在的故障,对电网的可靠运行有重要意义^[1-3]。传统的检修策略采取定期检修的方式对变压器进行维护,可能会出现“过修”或“失修”的情况,既在状态良好的变压器上浪费人力、物力,也使得存在缺陷或故障的变压器得不到及时维修,影响电力系统运行的安全稳定性^[4]。因此对油浸式变压器进行准确的状态评价,开展有效的状态检修,是保障设备可靠运行的有效措施^[5]。

为有效地进行变压器状态评价,国内外学者进行了大量研究^[6-9]。目前应用最广泛的是油浸式变压器状态评价导则^[10]、IEEE Std C57.104—2019^[11]等。此外,常见的状态评价方法有基于健康指数的方法^[12],综合考虑各种指标,将变压器的老化状态用健康指数的值进行表征,但健康指数的评估仍主要依赖于专家现场经验。文献[13]提出了用于变压器状态评估的模糊证据融合方法,该方法考虑了指标之间的相对关系,但权重分配仍采用主观权重,未考虑变压器运行过程中的动态变化。文献[14]建立了用于变压器状态寿命评估的自适应模糊神经网络,可以自适应地调整权重分配结果,但模型构建过程中需要大量的现场数据,在实际应用中难以满足数据量要求。文献[15]通过时间序列聚类的方法,对实际检测序列进行聚类分析并根据聚类结果分析设备运行状态是否异常,但该方法依赖于案例库的质量,可能出现多次评价结果不一致

的情况。文献[16]采用多元统计控制图,将变压器的多个检测指标转换为单一的统计参量,并基于统计参量对变压器进行状态判断,该方法中失效阈值为人为设定,缺乏依据。目前以层次结构为基础的方法在变压器状态评估中有着较多的研究^[17-20]。文献[21]建立了以故障类型为基础的层次结构,并进行权重分配,但权重分配基于统计数据,无法体现变压器的个体差异性。文献[22]采用层次灰关联分析法筛选关键指标,并采用筛选后的指标体系进行变压器的状态评估,该方法主要目标是筛选与变压器故障相关的关键指标,但故障集的建立仍存在不足。文献[23]基于层级结构和优劣解距离法,融合多名专家的经验进行权重分配并进一步对变压器进行状态评估,但由于权重分配仅基于专家经验,难以体现变压器状态在运行过程中的动态变化。可以看出,目前变压器的状态评价大多依赖于专家经验或统计数据,评价结果难以体现变压器的个体差异。

针对上述问题,文中提出基于熵权层次分析法的油浸式变压器绝缘状态评价方法。采用在线监测中的油中溶解气体指标,配合运行环境以及缺陷信息,构成绝缘状态评价的层次结构。根据层次分析法确定指标层的主观权重,并引入熵权权重进行修正,有效体现变压器运行过程中的个体差异与动态特征,进而能够更准确地评估变压器的实际绝缘状态。

1 变压器绝缘状态评估总体流程

文中采取的油浸式变压器绝缘状态评价流程如图1所示,核心内容为熵权修正的层次分析法。

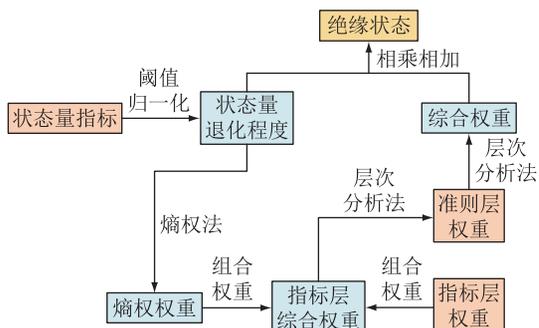


图1 油浸式变压器绝缘状态评价流程

Fig.1 Flowchart of oil-immersed power transformer insulation state evaluation

层次分析法是用于解决多目标决策问题的定量和定性结合的方法。该方法能够有效分析目标准则体系层次之间的关系,应用广泛^[24-26]。

采用层次分析法进行权重分配的第一步是确定层次分析结构,文中用于变压器绝缘状态评价的层次结构如图2所示。该结构分为目标层、准则层、指标层三部分。目标层即变压器的绝缘状态;准则层对应变压器指标的各个大类,包括油中溶解气体、运行环境和历史信息;指标层为对应准则层中每个大类的具体状态量指标。

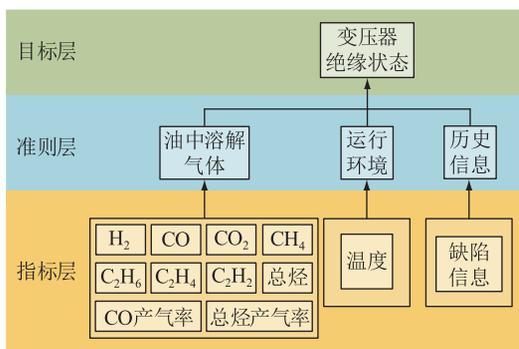


图2 油浸式变压器绝缘状态评价层次结构

Fig.2 Hierarchical structure of oil-immersed power transformer insulation state evaluation

2 基于熵权层次法的绝缘状态评价

为有效利用专家经验和现场实际数据对变压器绝缘状态进行评价,文中采取熵权层次分析法进行权重分配,具体步骤如图3所示。

基于熵权层次分析法的权重分配以层次分析法为主体,经熵权法修正,对指标层中各个指标的权重进行调整。首先基于专家经验,依照层次分析法的一般流程,构建各个层次之间的评价矩阵并进行静态权重的分配。其次,对各指标进行归一化处理,消除量纲的影响,并根据熵权法的思想,对底层指标进行动态权重分配。最后,采用组合权重的方

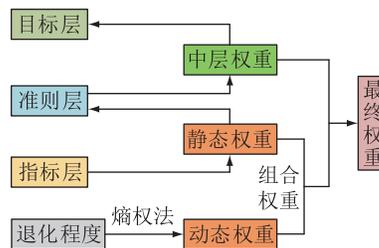


图3 基于熵权层次分析法的权重分配

Fig.3 Weight allocation based on entropy weight and analytic hierarchy process

法,结合底层的静态权重与动态权重,得到各指标的最终权重。

2.1 基于层次分析法的常权权重分配

基于层次分析法进行静态权重分配的第二步为根据专家经验,对层次结构中同层的不同元素关于上一层某个准则的重要性进行评价,形成评价矩阵,对同层中不同指标到上一层的权重进行分配。

对于图2所示变压器绝缘状态评价层次结构,设根据专家经验对同层任意2个指标进行重要性量化,可得到评估矩阵A:

$$A = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \cdots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \cdots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (1)$$

矩阵A为正互反矩阵,其元素采用九标度法确定。对于元素 a_{ij} ,其值代表第i个元素对第j个元素的重要性。

由于实际应用中,构造的评估矩阵A不一定为正互反矩阵,因此须对其进行一致性检验:

$$C_1 = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$C_R = \frac{C_1}{R_1} \quad (3)$$

式中: C_1 为一一致性指标; C_R 为一一致性比率; λ_{\max} 为A的最大特征值; n 为A的阶数; R_1 为平均随机一致性指标,按表1^[27]取值。

表1 不同矩阵阶数下 R_1 的取值

Table 1 Values for R_1 under different matrix orders

矩阵阶数	R_1	矩阵阶数	R_1
3	0.58	7	1.32
4	0.90	8	1.41
5	1.12	9	1.45
6	1.24	10	1.49

对图2所示变压器绝缘状态评价层次结构,按照表2进行编号,并设准则层到目标层的评价矩阵

为 U , 油中溶解气体指标层对应的评价矩阵为 X 。此外,运行环境和历史信息均只包含一个指标,无须建立评价矩阵。

表2 层次分析结构对应的编号分配
Table 2 Encoding for indexes corresponding to hierarchical structure

准则层	编号	评价指标层	编号
油中溶解气体	X_1	H_2	X_{11}
		CO	X_{12}
		CO_2	X_{13}
		CH_4	X_{14}
		C_2H_4	X_{15}
		C_2H_6	X_{16}
		C_2H_2	X_{17}
		总烃	X_{18}
		总烃产气速率	X_{19}
		CO 产气速率	X_{110}
运行环境	X_2	温度	X_{21}
历史信息	X_3	缺陷信息	X_{31}

根据文献[28-30]构建各层对应的评价矩阵,可以得到 X_1-X_3 的耦合矩阵 U 和 $X_{11}-X_{110}$ 的耦合矩阵 X 分别为:

$$U = \begin{bmatrix} 1.00 & 5.00 & 4.00 \\ 0.20 & 1.00 & 1.25 \\ 0.25 & 0.80 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$X = \begin{bmatrix} 1.00 & 0.72 & 0.52 & 0.80 & 0.53 & 1.00 & 0.69 & 0.25 & 0.77 & 0.50 \\ 1.39 & 1.00 & 0.72 & 1.11 & 0.93 & 1.39 & 0.96 & 0.81 & 1.07 & 0.69 \\ 1.92 & 1.39 & 1.00 & 1.55 & 1.00 & 1.90 & 1.35 & 1.13 & 1.49 & 0.97 \\ 1.25 & 0.91 & 0.65 & 1.00 & 0.66 & 1.25 & 0.87 & 0.73 & 0.96 & 0.63 \\ 1.89 & 1.37 & 1.00 & 1.52 & 1.00 & 1.89 & 1.32 & 1.11 & 1.46 & 0.94 \\ 1.00 & 0.72 & 0.53 & 0.71 & 0.53 & 1.00 & 0.69 & 0.58 & 0.77 & 0.51 \\ 1.43 & 1.03 & 0.74 & 1.14 & 0.75 & 1.44 & 1.00 & 0.84 & 1.10 & 0.71 \\ 3.98 & 1.23 & 0.88 & 1.36 & 0.90 & 1.72 & 1.19 & 1.00 & 1.31 & 0.85 \\ 1.29 & 0.93 & 0.67 & 1.04 & 0.68 & 1.29 & 0.90 & 0.76 & 1.00 & 0.65 \\ 2.00 & 1.45 & 1.03 & 1.59 & 1.06 & 2.00 & 1.40 & 1.18 & 1.53 & 1.00 \end{bmatrix} \quad (5)$$

根据式(4)和式(5)可得矩阵 U 和 X 对应的 C_1 和 C_R ,如表3所示。由表3可以看出,矩阵 U 和 X 的 C_R 均小于 0.1,所构建的评价矩阵满足一致性要求。

表3 矩阵 U 和 X 的一致性检验指标

矩阵	C_1	C_R
U	0.003 3	0.006 3
X	0.001 6	0.001 1

进而,可得到层次结构中各个指标的权重分配,如表4所示。

表4 基于层次分析法的权重分配

Table 4 Weight allocation based on analytic hierarchy process

准则层	权重	评价指标层	相对权重
油中溶解气体	0.69	H_2	0.06
		CO	0.09
		CO_2	0.13
		CH_4	0.08
		C_2H_4	0.13
		C_2H_6	0.07
		C_2H_2	0.10
		总烃	0.13
		总烃产气速率	0.09
		CO 产气速率	0.13
运行环境	0.16	温度	1.00
历史信息	0.15	缺陷信息	1.00

2.2 基于熵权法的动态权重分配

采用层次分析法进行权重分配可以体现出专家经验对于各个指标的重要度的认知,但同样由于矩阵的构建依赖于专家经验,带有较大主观性,难以体现个体的客观差异性。同时,层次分析法确定的权重为常权权重,在指标发生突变时可能会导致评价结果出现偏差甚至失效。因此,为使权重分配更能体现实际情况,文中引入熵权法^[31]对层次分析法中的指标层权重分配进行修正。

在信息论中,熵值的大小反映了信息无序化的程度,其值越小,系统无序化程度越低,说明该指标可以提供的信息更多。采用熵权法对各指标的权重分配进行调整,当某个指标的值增大时,会动态调整其权重增大,从而有效体现变压器绝缘状态变化情况。

此外,在进行熵值计算时,各个指标在数值上一般存在着较大的差距,为消除这种差异带来的影响,首先要对各个指标进行阈值归一化处理。

设准则层共有 m 个准则,第 i 个准则对应的指标层中有 n 个指标,设第 i 个准则中的第 j 个指标为 X_{ij} 。计算各个指标的归一化数值,对于正向指标,归一化数值计算对应式(6);对于负向指标,归一化数值计算对应式(7)。

$$u_{ij} = \frac{x_{ij} - X_{ij,low}}{X_{ij,up} - X_{ij,low}} \quad (6)$$

$$u_{ij} = \frac{X_{ij,up} - x_{ij}}{X_{ij,up} - X_{ij,low}} \quad (7)$$

式中: x_{ij} 为指标 X_{ij} 对应的具体值; u_{ij} 为 x_{ij} 对应的归

一化值; $X_{ij,up}$ 、 $X_{ij,low}$ 分别为指标 X_{ij} 对应的取值范围的上下界。各指标的取值范围如表 5 所示^[30,32]。

表 5 指标对应的取值范围
Table 5 Value range for indexes

指标名称	取值范围
$H_2/(\mu L \cdot L^{-1})$	0~150
$CO/(\mu L \cdot L^{-1})$	0~350
$CO_2/(\mu L \cdot L^{-1})$	0~2 500
$CH_4/(\mu L \cdot L^{-1})$	0~120
$C_2H_4/(\mu L \cdot L^{-1})$	0~50
$C_2H_6/(\mu L \cdot L^{-1})$	0~65
$C_2H_2/(\mu L \cdot L^{-1})$	0~1
$H_2/(\mu L \cdot L^{-1})$	0~150
每月总烃产气速率/%	0~10
每月 CO 产气速率/%	0~100
温度/℃	-25~40
缺陷信息	100~0

根据 X_{ij} 对应的归一化值 u_{ij} , 可以将这 n 个指标的相对大小表示为:

$$f_{ij} = u_{ij} / \sum_{j=1}^n u_{ij} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

进而根据熵值的定义, 可以将 X_{ij} 对应的熵值表示为:

$$H_{ij} = - \frac{1}{\ln n} (f_{ij} \ln f_{ij}) \quad (9)$$

且当 $f_{ij} = 0$ 时, $\ln f_{ij}$ 为 $-\infty$, 此时有 $f_{ij} \ln f_{ij} = 0$ 。

从而第 i 个准则的指标层所对应的熵权重向量可以表示为式(10)、式(11):

$$W_i = (\omega_{ij})_{1 \times m} \quad (10)$$

$$\begin{cases} \omega_{ij} = \frac{1 - H_{ij}}{n - \sum_{j=1}^n H_{ij}} \\ \sum_{j=1}^n \omega_{ij} = 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: W_i 为第 i 个准则对应的权重向量, 为 $1 \times m$ 的矩阵, 即 m 行向量; ω_{ij} 为第 i 个准则中第 j 个指标的熵权重。

2.3 组合权重分配与绝缘状态评价

根据 2.1 节与 2.2 节所述, 通过层次分析法和熵权法可以分别得到指标层权重分配的主观权重向量和客观权重向量, 分别设为 W_s 和 W_o 。为了结合主观和客观两部分, 作出有效的绝缘状态评价, 文中采用组合权重的方法, 结合 W_s 和 W_o , 得到综合评价权重 W_c 。

文中采取的组合权重计算公式如下:

$$\omega_{c,ij} = \frac{\omega_{s,ij} \omega_{o,ij}}{\sum_{j=1}^n \omega_{s,ij} \omega_{o,ij}} \quad (12)$$

式中: $\omega_{c,ij}$ 、 $\omega_{s,ij}$ 、 $\omega_{o,ij}$ 分别为第 i 个准则对应的指标层中第 j 个指标的相对综合权重、相对主观权重和相对客观权重的具体值。

进而, 结合准则层的权重向量, 可将指标层中第 j 个指标的绝对综合权重 $\omega_{c,j}$ 表示为:

$$\omega_{c,j} = \omega_i \omega_{c,ij} \quad (13)$$

式中: ω_i 为第 i 个准则层对应到目标层的权重。

最后, 结合各个指标对应的归一化值 u_{ij} 和绝对综合权重 $\omega_{c,j}$, 可得绝缘状态的评价指标 K 为:

$$K = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n u_{ij} \omega_{c,j} \quad (14)$$

参考《电网资产战略管理》白皮书中关于变压器健康状态的划分, 文中将变压器绝缘状态划分为 5 种, 即严重、异常、注意、良好和健康。具体区间划分如表 6 所示^[33]。根据得到的 K 值, 参考表 6, 即可得到变压器具体的绝缘状态。

表 6 K 值与变压器绝缘等级对应表

Table 6 Corresponding relationship between value of K and insulation condition of transformers

K	绝缘状态
[0,0.2)	严重
[0.2,0.4)	异常
[0.4,0.6)	注意
[0.6,0.8)	良好
[0.8,1.0]	健康

3 基于现场数据的绝缘状态实例分析

为验证文中提出的基于熵权层次分析法的油浸式电力变压器绝缘状态评价方法的有效性, 文中选取具有代表性的 4 台 500 kV 变压器(下称变压器 A、变压器 B、变压器 C、变压器 D) 的监测数据作为典型案例。这 4 台变压器的基本信息和监测数据分别如表 7、表 8 所示。

表 7 变压器的基本信息

Table 7 Basic information of the transformers

参数	A	B	C	D
电压等级/kV	500	500	500	500
容量/(kV·A)	334	250	750	334
投运时间	2005-10	2018-09	2011-07	2004-06
型号	ODFS	ODFPS	ODFSZ	ODFS

根据式(6)、式(7)对表 8 所示监测数据进行归一化处理, 结果如图 4 所示。

表 8 变压器监测数据

Table 8 Monitoring data for transformers

指标	A	B	C	D
$H_2/(\mu L \cdot L^{-1})$	18.80	37.88	42.31	13.15
$CO/(\mu L \cdot L^{-1})$	558.34	193.59	198.80	282.21
$CO_2/(\mu L \cdot L^{-1})$	1 375.09	887.58	933.36	460.08
$CH_4/(\mu L \cdot L^{-1})$	6.42	17.65	17.54	3.03
$C_2H_4/(\mu L \cdot L^{-1})$	0.68	16.95	16.37	0.22
$C_2H_6/(\mu L \cdot L^{-1})$	0.85	4.30	4.29	0.26
$C_2H_2/(\mu L \cdot L^{-1})$	0.85	0.10	0.17	0
总烃/ $(\mu L \cdot L^{-1})$	7.95	39	38.37	3.51
每月总烃产气速率/%	3.40	1.90	-0.54	3.87
每月 CO 产气速率/%	102.77	-4.24	0.90	15.48
温度/ $^{\circ}C$	26	20	25	16
缺陷信息	80	96	68	76

注:缺陷信息为根据状态评价导则^[6]扣分后的得分。

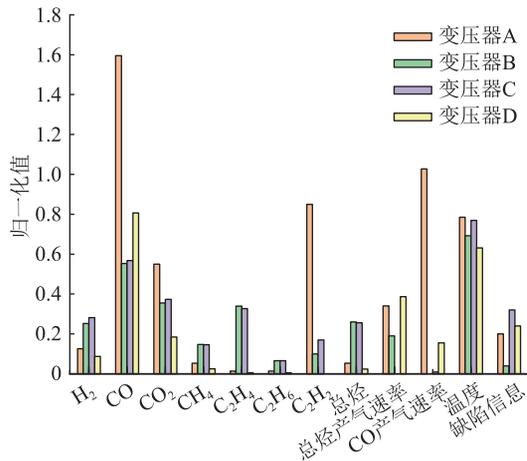


图 4 变压器各指标归一化后的具体值

Fig.4 Normalized value for indexes of transformers

进而,利用式(8)一式(11)并结合图 4 所示的归一化结果,对各个指标进行客观权重分配,结果如图 5 所示。其中,运行环境和历史信息均只有一个指标,对应的客观权重恒为 1,未在图 5 中标出。

结合表 4 所示的主观权重,按照式(12)进行组合权重计算,得到的综合权重分配结果图 6 所示。

由图 5 可以看出,根据熵权法确定的客观权重可以反映各变压器中不同指标劣化程度之间的关系。如,对于变压器 A,其 CO 含量、CO 产气率以及乙炔含量存在异常,体现在客观权重分配上为这三者权重占比较高。从而,在组合权重中,提高这三者对应的综合权重,保证异常信息的有效体现。

根据表 4、图 5 和图 6 所示的不同方法下的权重分配结果,结合各变压器各项指标的归一化值,可以得到不同方法下各变压器的绝缘状态评价结果,如表 9 和图 7 所示。其中,表 9 给出了不同方法对各个变压器绝缘状态的评价结果,图 7 展示了不

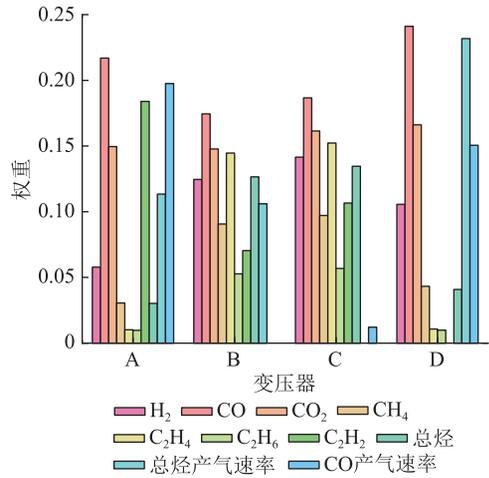


图 5 基于熵权法的客观权重分配结果

Fig.5 Objective weights allocation based on entropy weight

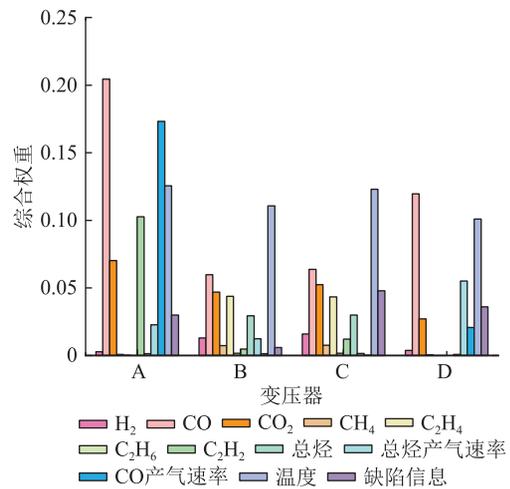


图 6 基于组合权重法的综合权重分配结果

Fig.6 Comprehensive weights allocation based on combined weight

同方法下各变压器的 K 值对比。

表 9 不同方法下变压器绝缘状态对比

Table 9 Comparison of insulation condition of transformers under different methods

评价方法	A	B	C	D
主观	注意	良好	良好	良好
客观	严重	注意	注意	注意
综合	异常	良好	良好	良好

由表 9 可以看出,对于所选的 4 台变压器,在 3 种评价方法下,变压器 A 的绝缘状态均明显差于其余 3 台变压器,同时,变压器 B、C、D 的绝缘状态在 3 种方法下均相同。结合图 7 可以看出,对于变压器 A 来说,其指标存在明显的异常情况。在采用主观权重进行评价时,变压器 A 的状态仅与其余变压器相差 1 级,难以体现变压器 A 的异常情况。而根据熵权法确定的客观权重中异常指标权重较高,导

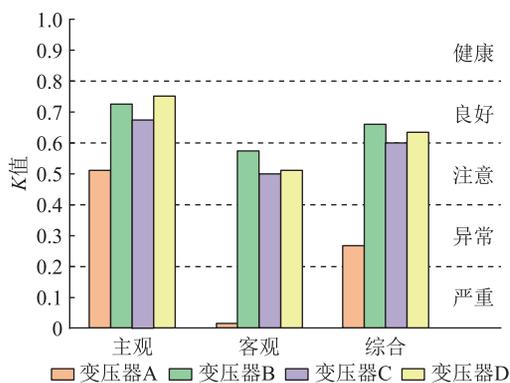


图7 不同方法下各变压器的 K 值对比
Fig.7 Comparison of K values of each transformer under different methods

致此时变压器 A 的 K 值极低,仅为 0.07。此外,对于其余 3 台变压器,其状态量无明显的异常情况,仅采用熵权法时,其绝缘状态相较于主观权重时均相差一个等级。可以看出,在仅采用主观权重或客观权重时,会分别导致评价结果趋于保守或严格。

对比 3 种方法对于各变压器的评价结果可以看出,采用组合权重时,变压器 A 的绝缘状态相较于采用主观权重时有着明显的下降,而其余 3 台变压器的绝缘状态值虽略微下降,但仍处于同一个等级。因此,通过组合权重的方法,既可以保留专家经验对各指标相互之间关系的判断,同时也能有效识别变压器的异常状态。

4 结论

文中结合油中溶解气体、运行环境以及缺陷信息等 3 个大项及 12 个相应的具体指标构建了变压器绝缘状态评价的层次结构,提出一种熵权法修正的层次分析法,并结合实际案例得到了油浸式变压器的绝缘状态评价。具体结论如下:

(1) 基于层次结构,根据专家经验进行主观权重分配并引入熵权权重对底层权重进行差异化调整,可以有效保留专家经验,在保证评价结果适度的前提下实现变压器异常情况的及时发现。

(2) 文中将绝缘状态从状态导则的 4 种细分为健康、良好、注意、异常、严重 5 个等级,使得变压器绝缘状态感知更为准确。

(3) 层次结构中采取的各项指标来源主要为在线监测,可以实现绝缘状态的实时评价,为进一步的趋势分析和状态检修提供参考。

参考文献:

[1] TAMMA W R, PRASOJO R A, SUWARNO. High voltage power transformer condition assessment considering the health index value and its decreasing rate[J]. High Voltage, 2021, 6(2):

314-327.
 [2] FAN J M, FU C Y, YIN H, et al. Power transformer condition assessment based on online monitor with SOFC chromatographic detector[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 118: 105805.
 [3] AHMADI S A, SANAYE-PASAND M. A robust multi-layer framework for online condition assessment of power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2022, 37(2): 947-954.
 [4] 韩笑,王新迎,韩帅,等. 基于不平衡数据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.
 [5] 刘云鹏,许自强,李刚,等. 人工智能驱动的数据分析技术在电力变压器状态检修中的应用综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(2): 337-348.
 LIU Yunpeng, XU Ziqiang, LI Gang, et al. Review on applications of artificial intelligence driven data analysis technology in condition based maintenance of power transformers[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(2): 337-348.
 [6] 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.
 [7] 王庆杰,马静,李佳,等. 基于云模型与相似度的配电变压器电气状态综合评估[J]. 电力信息与通信技术, 2022, 20(10): 54-61.
 WANG Qingjie, MA Jing, LI Jia, et al. Comprehensive evaluation of distribution transformer electrical state based on cloud model and similarity[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(10): 54-61.
 [8] 张寒,刘卫东,潘志敏,等. 基于自适应概率神经网络的变压器健康状态评估[J]. 高压电器, 2022, 58(2): 103-110.
 ZHANG Han, LIU Weidong, PAN Zhimin, et al. Health state assessment of transformer based on adaptive probabilistic neural network[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(2): 103-110.
 [9] 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.
 [10] 国家电网公司. 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则: Q/GDW 169—2016[S]. 北京:中国电力出版社, 2016.
 State Grid Corporation of China. Guide for condition evaluation of oil-immersed power transformers (reactors): Q/GDW 169-2016[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2016.

- [11] The Institute of Electrical and Electronics Engineers. IEEE guide for the interpretation of gases generated in mineral oil-immersed transformers; IEEE Std C57.104-2019 [S]. New York, USA; 2019.
- [12] AZMI A, JASNI J, AZIS N, et al. Evolution of transformer health index in the form of mathematical equation [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 76: 687-700.
- [13] TIAN F L, JING Z Z, ZHAO H A, et al. A synthetic condition assessment model for power transformers using the fuzzy evidence fusion method [J]. *Energies*, 2019, 12(5): 857.
- [14] 胡碧伟, 邓祥力, 贾声昊. 基于 ANFIS 的变压器寿命预测和状态评估 [J]. *电测与仪表*, 2022, 59(1): 61-68.
HU Biwei, DENG Xiangli, JIA Shenghao. Transformer life estimation and state assessment based on ANFIS [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2022, 59(1): 61-68.
- [15] 辛建波, 康琛, 翁新林, 等. 基于聚类和时间序列分析的变压器状态评价方法 [J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(3): 64-70.
XIN Jianbo, KANG Chen, WENG Xinlin, et al. Evaluation method of transformer state based on clustering and time series analysis [J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(3): 64-70.
- [16] 程宏波, 伦利, 康琛, 等. 一种基于多元统计分析的变压器状态评判方法 [J]. *电网技术*, 2018, 42(8): 2719-2724.
CHENG Hongbo, LUN Li, KANG Chen, et al. A method for evaluating the state of a transformer based on multivariate statistical analysis [J]. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 2719-2724.
- [17] SUN L J, MA Z, SHANG Y W, et al. Research on multi-attribute decision-making in condition evaluation for power transformer using fuzzy AHP and modified weighted averaging combination [J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(15): 3855-3864.
- [18] 杜江, 孙铭阳. 基于变权灰云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.
- [19] 吴奕, 朱海兵, 周志成, 等. 基于熵权模糊物元和主元分析的变压器状态评价 [J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(17): 1-7.
WU Yi, ZHU Haibing, ZHOU Zhicheng, et al. Transformer condition assessment based on entropy fuzzy matter-element and principal component analysis [J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(17): 1-7.
- [20] AZIS PRASOJO R, SUWARNO, ULFA MAULIDEVI N, et al. A multiple expert consensus model for transformer assessment index weighting factor determination [C]//2020 8th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis (CMD). Phuket, Thailand. IEEE, 2020: 234-237.
- [21] 宋人杰, 刘瑞英, 刘耀伟, 等. 基于层次灰关联分析的变压器状态评估关键指标体系构建及应用 [J]. *高电压技术*, 2018, 44(8): 2509-2515.
SONG Renjie, LIU Ruiying, LIU Yaowei, et al. Key indicator system establishment and application for transformer condition assessment based on hierarchy grey relation analysis [J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(8): 2509-2515.
- [22] 张晶晶, 许修乐, 丁明, 等. 基于模糊层次分析法的变压器状态评估 [J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(3): 75-81.
ZHANG Jingjing, XU Xiule, DING Ming, et al. A condition assessment method of power transformers based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(3): 75-81.
- [23] MADAVAN R, SAROJA S. Decision making on the state of transformers based on insulation condition using AHP and TOPSIS methods [J]. *IET Science, Measurement & Technology*, 2020, 14(2): 137-145.
- [24] 邓铭, 黄际元, 吴东琳, 等. 基于层次分析法的“源-网-荷-储”互动方案汇聚潜力评估 [J]. *供用电*, 2022, 39(9): 83-92.
DENG Ming, HUANG Jiyuan, WU Donglin, et al. Assessment of the convergence potential of the "source-network-load-storage" interactive scheme based on the analytic hierarchy process [J]. *Distribution & Utilization*, 2022, 39(9): 83-92.
- [25] 彭俊程, 贺英倩, 周华兵, 等. 基于模糊层次分析法的扶贫光伏电站类型选择 [J]. *供用电*, 2021, 38(5): 70-75.
PENG Juncheng, HE Yingqian, ZHOU Huabing, et al. Photovoltaic poverty alleviation power stations type selection based on fuzzy analytic hierarchy process [J]. *Distribution & Utilization*, 2021, 38(5): 70-75.
- [26] 季玉琦, 潘超, 肖晗, 等. 分布式电源电压支撑能力层次分析评价 [J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(11): 163-171.
JI Yuqi, PAN Chao, XIAO Han, et al. Hierarchical analysis and evaluation of the voltage support capability of distributed generation [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(11): 163-171.
- [27] 洪志国, 李焱, 范植华, 等. 层次分析法中高阶平均随机一致性指标 (RI) 的计算 [J]. *计算机工程与应用*, 2002, 38(12): 45-47, 150.
HONG Zhiguo, LI Yan, FAN Zhihua, et al. Calculation on high-ranked RI of analytic hierarchy process [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2002, 38(12): 45-47, 150.
- [28] 廖瑞金, 张懿议, 黄飞龙, 等. 基于可拓分析法的电力变压器本体绝缘状态评估 [J]. *高电压技术*, 2012, 38(3): 521-526.
LIAO Ruijin, ZHANG Yiyi, HUANG Feilong, et al. Power transformer condition assessment strategy using matter element analysis [J]. *High Voltage Engineering*, 2012, 38(3): 521-526.
- [29] 张鹏, 齐波, 李文璞, 等. 考虑部位和性能的电力变压器差异化评价方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(20): 6138-6147, 6195.
ZHANG Peng, QI Bo, LI Wenpu, et al. A differentiated evaluation

- tion method of transformers considering the part and its performances[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(20): 6138-6147, 6195.
- [30] 党建, 魏慧, 贾嵘, 等. 基于定量修正层次分析的变压器性能评估方法研究[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 133-141, 151. DANG Jian, WEI Hui, JIA Rong, et al. Research on transformer performance evaluation based on quantitative correction analytic hierarchy process[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 133-141, 151.
- [31] 郝如海, 智勇, 祁莹, 等. 基于熵权法的新能源高渗透率送端电网风险模糊综合评价[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(1): 73-78. HAO Ruhai, ZHI Yong, QI Ying, et al. Fuzzy synthetic evaluation based on entropy method of high renewable energy penetration power grid at sending end[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(1): 73-78.
- [32] 中国电器工业协会. 电力变压器第 1 部分: GB/T 1094.1—2013[S]. 北京: 中国标准出版社, 2013. CEEIA. Power transformers-part 1: GB/T 1094.1-2013[S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [33] 国际电工委员会(IEC). 电网资产战略管理[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017. International Electrotechnical Commission. Strategic asset management of power networks[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2017.

作者简介:



李波

李波(1997), 男, 硕士, 研究方向为电气设备健康管理与寿命预测(E-mail: lb2453870956@163.com);

张文乾(1997), 男, 硕士在读, 研究方向为电气设备可靠性评估;

刘维(2000), 男, 硕士在读, 研究方向为多电飞机电气绝缘与故障诊断。

Insulation condition evaluation of oil-immersed transformer based on entropy weight hierarchy method

LI Bo, ZHANG Wenqian, LIU Wei, CUI Dezhi, JIANG Jun, ZHANG Chaohai
(Nanjing University of Aeronautics and Astronautics (Jiangsu Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion), Nanjing 211106, China)

Abstract: In order to evaluate the insulation condition of oil-immersed transformers effectively, a weight allocation method considering expert experience and degradation state is proposed in this paper. Firstly, a hierarchical structure for insulation condition evaluation is built based on dissolved gas in oil, ambient temperature and defect information, and subjective weights is assigned to each index based on expert experience. Then, the method of combined weight is adopted to introduce entropy weight into the weight allocation of index layer, thus weights of the index layer are dynamically adjusted to reflect the differences in the individual operation process while retaining expert experience for the criterion layer. Furthermore, the transformer insulation state is subdivided into five states from common four to realize more accurate perception of insulation state. Finally, case study of four 500 kV transformers shows that the method proposed can effectively identify normal transformers and discriminate abnormal transformers compared with the method based only on objective or subjective weight, which verifies the rationality of the method.

Keywords: insulation condition; analytic hierarchy process; entropy weight method; weight combination; differentiation evaluation; oil-immersed transformer

(编辑 方晶)