

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.03.002

基于因子分析法与 $D-S$ 证据理论的变压器 关键参量提取和状态评估

曾丹乐¹, 杜修明², 盛戈峰¹, 王 辉², 陈玉峰², 江秀臣¹

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250002)

摘要: 变压器的状态评估是运行、检修与维护的重要依据,而变压器的评估参量类型冗余、数量繁多等是该环节工作的难点问题。针对上述问题,该文在深入分析变压器状态评估的需求和研究现状的基础上,构建了基于关键评估参量体系及 $D-S$ 证据理论的多层次综合模糊评判模型。首先利用因子分析法提取并构建了关键参量指标体系;其次结合层次分析法获得评价系统中各子指标的最优权重,从而依据各自隶属度函数获得各项目层的评价结果;最后依据 $D-S$ 证据理论对各项项目层的评估结果进行了融合评估决策。经实例分析,该模型能有效且合理地对变压器状态进行评估。

关键词: 电力变压器; 状态评估; 因子分析法; 关键参量; $D-S$ 证据理论

Key Parameters Extraction and Condition Evaluation of Transformer Based on Factor Analysis and $D-S$ Evidence Theory

ZENG Danle¹, DU Xiuming², SHENG Gehao¹, WANG Hui², CHEN Yufeng², JIANG Xiuchen¹

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute of Shandong Power Supply Company, Jinan 250002, China)

Abstract: Condition evaluation is an important basis for operation, repair and maintenance of transformer. However, the redundancy and great number of evaluation parameters bring difficulty. In this paper, the demand and present researches on condition evaluation of transformer are analyzed, and a multi-level comprehensive fuzzy evaluation model is constructed on the basis of key evaluation parameters system and $D-S$ evidence theory. Firstly, a system of key evaluation parameters is extracted by using factor analysis method. Then, analytic hierarchy process(AHP) is applied to obtain the optimal weight of each parameter, and results of each evaluation layer are computed based on their membership functions. Finally, taking the results of project layers as inputs, fusion evaluation decision is made based on $D-S$ evidence theory. Analysis of an example shows that the proposed evaluation model can effectively and reasonably evaluate transformer condition.

Key words: transformer; condition evaluation; factor analysis; key parameters; $D-S$ evidence theory

0 引言

电力变压器作为电力系统的关键设备,其运行状态直接关系到系统的运行安全与稳定,及时而准确地进行状态及故障监测与维修关系重大。长期以

来,基于缺陷管理的变压器状态评估是状态检修中的关键问题,要对变压器的运行状态进行准确而高效地评估,就要合理地建立评价指标体系并确定合适的评估方法。

现阶段变压器的状态信息包括预防性试验、在线监测数据、不良运行工况、缺陷、检修记录等,电力

收稿日期:2015-10-22; 修回日期:2015-11-26

基金项目:国家高技术研究发展计划(863 计划)(SS2012AA050803)。

Project Supported by the National High-tech R & D Program(863 Program) of China(SS2012AA050803).

变压器的状态评估参量种类十分繁多。文[1]中建立了油浸式变压器的状态评价指标体系,将变压器按部件分别进行评估;文[2]中提出了基于不同数据类型的综合性层次指标评价体系,但是对于附件的各参量指标未做进一步探讨;文[3]中提出了按各组件划分并基于数据类型的指标体系,但对于代表性参量指标的选取主要依据专家意见及行业经验,并未提出客观的科学判据。因此现阶段基础参量体系研究难点总结如下:①基础参量体系的建立不够全面和规范;②代表性参量体系存在冗余;③代表性参量的选取缺乏科学的判据。

状态评估方面引入了众多的现代综合评价算法,包括模糊综合评判法^[2,4-7]、法灰色理论^[8-10]、贝叶斯网络^[11-12]、物元理论^[13-15]等。基本思路是首先建立变压器的评估指标体系,然后划分变压器的状态等级,根据状态等级划分指标数值对应的隶属度,最后综合得到变压器整体状态。但研究工作如对指标的选取并未深入,模型对于权重的量化及隶属函数的建立主观性较大,并且无法客观全面地反应所有变化因素对于状态的影响。

文中建立了基于不同参量类型的变压器基础参量评判体系,以变压器实际运行数据、故障缺陷情况为依据采用因子分析法分别提取了不同子体系的关键参量指标,从而精简参量体系,去除了状态评判体系中的一些冗余指标,使参量体系能紧密结合变压器的实际运维。在关键参量体系的基础上,结合层次分析法确定各项目及下层指标权重,以多层次模糊综合评判为基础,利用 $D-S$ 证据理论,将三大项目层证据体模糊评判结果进行有效的融合,形成一个新的证据体进行评估决策,从而提高评估的准确性与全面性。

1 变压器综合评估的参量体系与评判依据

1.1 状态评估基础参量体系

为了尽量使评估指标全面、真实反映变压器的运行状态,考虑到变压器状态评估的可操作性,根据文[1,4]要求,文中按各组件分项建立基础状态参量体系,因为各组件之间的功能结构比较独立,相互影响较小,从状态性能数据(A_1)、人工巡检数据(A_2)及技术性能参数(A_3)3大类别构建本体、套管、冷却系统、分接开关及非电量保护装置的基础状态参量体系。出于篇幅的考虑,文中以变压器本体为例给出状态评估基础参量评价体系,见图1。

图1中,本体状态性能数据(A_1)总共梳理22个状态性能数据基础参量,包括带电检测数据,电气试

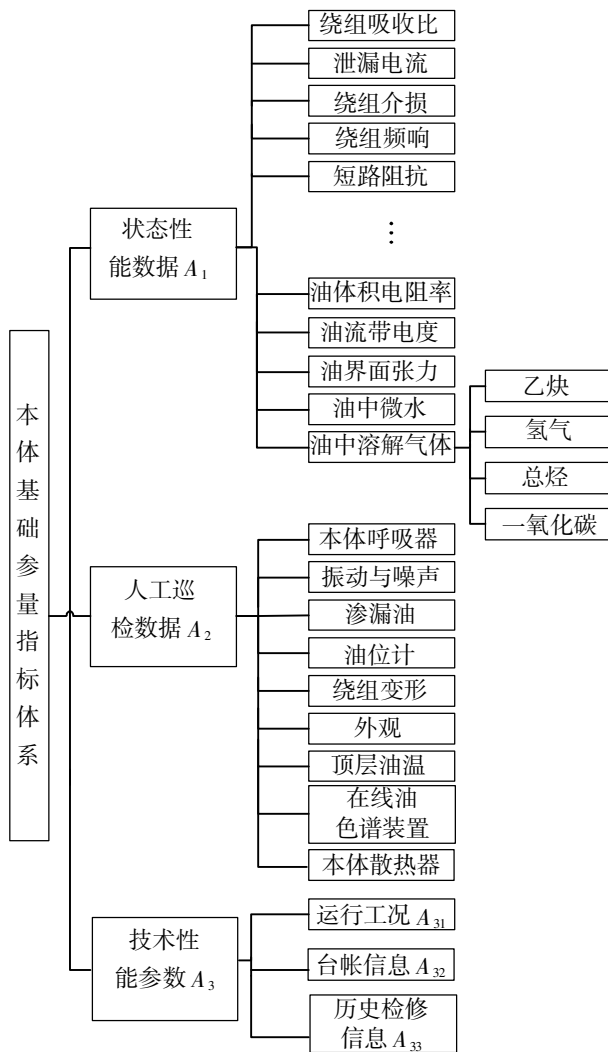


图1 变压器本体状态评估基础参量体系

Fig. 1 Fundamental parameter system of condition assessment

验和油化试验等信息。本体人工巡检数据(A_2)在状态评估中也非常关键,主要是通过一些温度、油位等测量装置及人工巡视获得数据。技术性能参数(A_3)主要表征了变压器本体的历史运行状态,包括台帐信息、运行工况及检修历史等信息。

1.2 关键状态参量的判断依据选取

考虑到当电力变压器发生故障时,不同故障类型往往伴有多个状态性能数据状态参量的变化,因此选择历史故障数据作为状态性能参量其中一个重要的判据;变压器的一般缺陷数据主要和人工巡检项目中的基础参量相关;对于南网标准缺陷知识库中缺陷对应的相关状态参量、输变电设备状态评价导则及状态检修导则是对实际状态评估中的关键参量选取具有指导性的意义;在线监测的实时数据是变压器状态动态评估的重要部分,也是定量数据选取的必要依据。判据类型见表1。

因此,选取关键参数时将基础参数体系的每一

表 1 变电设备状态评估关键参量体系选取判据

Table 1 Key parameter selection criterion of condition assessment

关键参量判据类型	内容
历年故障统计	依照文[6]中给出的 900 组故障数据统计。
历年一般缺陷统计	依照南方电网 500 组历年缺陷历史数据统计。
输变电设备状态评价导则	国家电网公司《油浸变压器状态评价导则》2011。
输变电设备状态检修导则	国家电网公司《油浸变压器状态检修导则》2011。
南方电网一次设备标准缺陷知识库 ^[16]	由南方电网公司给出的变电一次设备标准缺陷判定方法, 不同的缺陷类型对应不同的状态参量。
在线监测参量体系	由传感器监测的部分状态参量, 包括油色谱, 局部放电, 顶层油温等参量。

个参量进行量化, 可构成一个可用作综合因子分析的多维判据矩阵。文中将每个参量判据量化为一个 5 维数组, 即参量判据 $X_i=(D_1, D_2, D_3, D_4, D_5)$ 。

2 基于因子分析法确定变压器状态评估关键参量体系

2.1 因子分析法原理

因子分析法通过研究多个指标的相关矩阵的内部依赖关系, 找出控制所有变量的少数公因子, 将每个指标变量表示成公因子的线性组合, 再现原始变量与因子之间的相关关系, 而寻求指标变量基本结构, 减少变量维数, 用少数的变量解释问题^[17-18]。

设评价总体有 k 个评价指标, n 个判据样本, 这样就构成一个 $k \times n$ 阶的数据矩阵

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ x_{k1} & x_{k2} & \cdots & x_{kn} \end{bmatrix}。$$

简记为: $X=AF+\varepsilon$ 。式中, $F=(F_1, F_2, \dots, F_q)'$ 称为公共因子; $\varepsilon=(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_k)'$ 称为特殊因子, $q \leq k$, 矩阵 $A=(a_{ij})_{k \times q}$ 称为因子载荷矩阵。关于因子分析模型有如下假定:

- 1) F 和 ε 相互独立;
- 2) $E(F)=0$;
- 3) $E(\varepsilon)=0$;
- 4) $D(F)=I$;
- 5) $D(\varepsilon)=\text{diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_k^2)$ 。

因子分析法的实质就是确定原来变量 $X_j(j=1, 2, \dots, k)$ 在诸主成分 $F_i(i=1, 2, \dots, q)$ 上的荷载 $A_{ij}(i=1, 2, \dots, q; j=1, 2, \dots, k)$ 。

对于按主成分方法求解的因子分析模型, 因子载荷矩阵为

$$A=(\sqrt{\lambda_1} \alpha_1, \sqrt{\lambda_2} \alpha_2, \dots, \sqrt{\lambda_q} \alpha_q)。 \quad (1)$$

2.2 关键参量体系提取步骤

2.2.1 建立关键参量判据矩阵

状态性能及人工巡检关键参量判据体系见表 2。依据表 2 建立建立状态评估参量判据矩阵, 标准化数据矩阵。

表 2 状态性能及人工巡检关键参量判据体系

Table 2 Key parameter selection criterion system of state performance and manual inspection

关键参量	判据体系
D_1	状态性能数据: 表示历年故障统计中对应该参量的百分比。 人工巡检数据: 表示历年一般缺陷统计中对应该参量的百分比。
D_2	表示南网缺陷库中各类缺陷对应应该参量的个数
D_3	表示输变电设备状态评价导则评价体系中对应应该参量的个数。
D_4	表示输变电设备状态检修导则中各类检修对应应该参量的个数。
D_5	表示在线监测体系中该参量是否存在, 1 表示是, 0 表示否。

2.2.2 计算公共因子特征值及公共因子累计贡献率

通过计算标准量化矩阵 X 的相关系数矩阵 R , 得到各基础参量之间的相关性解特征方程 $|\lambda I - R| = 0$, 用 Jacobi 方法求出矩阵 R 的特征值并使其按大小顺序排列: $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q$, 并接出对应的特征向量:

$$\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_q。$$

公共因子 i 的累计贡献率 S_i 为

$$S_i = \frac{\sum_{j=1}^i \lambda_j}{\sum_{j=1}^q \lambda_j}。 \quad (2)$$

按照累计贡献率 S_i 的置信区间[0.85, 0.95]提取前 i 个特征值所对应的公共因子。

2.2.3 计算基础参量综合贡献率得分

通过公共因子对应的特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i$ 及特征参量 $\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_i$ 按照式(1)得出因子载荷矩阵, 进而计算出各参量的在公共因子上的综合贡献率

$$\alpha = \sqrt{\lambda_1} \alpha_1 + \sqrt{\lambda_2} \alpha_2 + \dots + \sqrt{\lambda_i} \alpha_i。 \quad (3)$$

2.2.4 关键参量提取依据

基础参量在公共因子上所反映的综合贡献率即

其在关键参量判据中重要性的体现,因此文中选取基础参量综合贡献率为正数的基础参量为变压器技术性能数据的关键参量。

2.3 状态性能及人工巡检关键参量提取

由于技术性能参数定性数据较多,多根据专家经验判断并且缺少大量历史数据,对状态性能数据人工巡检参量作关键参量的提取,文中以本体状态性能参量体系为例。

依据表 2 列出的关键参量判据体系建立本体的状态性能基础参量判据矩阵,见表 3。文中认为原评价指标数据矩阵 X 的变异度与其重要性相当,在做因子分析法时可不标准化。

表 3 本体状态性能基础参量判据矩阵

Table 3 Criterion matrix of basic parameters on state performance

序号	基础参量	$D_1/\%$	D_2	D_3	D_4	D_5
1	绕组吸收比	8.4	0	1	1	0
2	泄漏电流	0.0	0	1	1	0
3	绕组介损	23.1	1	1	1	0
4	绕组频响	0.0	0	0	0	0
5	短路阻抗	11.2	0	0	0	0
6	绕组直流电阻	29.7	1	1	1	0
7	局部放电	21.1	0	0	0	1
8	绕组变比	0.0	0	0	0	0
9	铁心绝缘电阻	29.1	1	0	2	0
10	绕组电容量	11.0	0	0	0	0
11	铁心接地电流	12.1	1	0	2	1
12	铁心空载损耗	0.0	0	0	0	0
13	绕组极化指数	7.9	0	0	0	0
14	油介损	41.5	1	1	1	0
15	油击穿电压	18.0	1	1	0	0
16	油中糠醛	13.0	0	1	1	0
17	油纸聚合度	12.4	0	1	1	0
18	油体积电阻率	37.8	0	0	0	0
19	油流带电度	10.4	0	0	0	0
20	油界面张力	0.0	0	0	0	0
21	油中微水	26.3	1	1	3	1
22	油中溶解气体	39.5	1	1	3	1

通过计算上述矩阵的相关系数矩阵 $R(22 \times 22)$,并求出矩阵 R 特征值并使其按大小顺序排列如下

$$\lambda_1=10.007\ 5;$$

$$\lambda_2=4.118\ 2;$$

$$\lambda_3=2.669\ 4;$$

$$\lambda_4=1.205\ 2;$$

$$\lambda_5 \cdots \lambda_{22}=0。$$

依据式(2),得到前 3 个因子的累计贡献率为 93.3%

$\geq 85\%$,属于算法所要求的 85%~95%的置信区间,说明提取 3 个公共因子是合理的。

通过特征值 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 及其所对应的特征参量据式(1)得出因子载荷矩阵,进而按式(3)计算出各参量的在公共因子上的综合贡献率,结果见图 2。

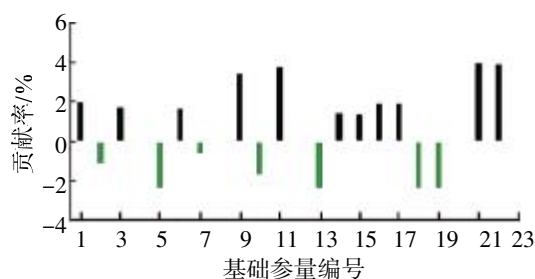


图 2 状态性能基础参量综合贡献率

Fig. 2 Comprehensive contribution rate of state performance parameters

如图 2 所示,文中选取基础参量综合贡献率为正数的基础参量为变压器状态性能数据的关键参量,见表 4。

表 4 本体状态性能数据关键参量

Table 4 Key parameters on state performance

基础参量编号	关键参量
1	绕组吸收比 X_1
3	绕组介损 X_2
6	绕组直流电阻 X_3
9	铁心绝缘电阻 X_4
11	铁心接地电流 X_5
14	油介损 X_6
15	油击穿电压 X_7
16	油中糠醛 X_8
17	油纸聚合度 X_9
21	油中微水 X_{10}
22	油中溶解气体 X_{11}

同理,对本体人工巡检部分基础参量体系应用因子分析法后,得到的关键参量体系见表 5。

表 5 本体人工巡检关键参量

Table 5 Key parameters on manual inspection

基础参量编号	关键参量
1	本体呼吸器 A_{21}
2	振动与噪声 A_{22}
3	渗漏油 A_{23}
4	油位 A_{24}
5	绕组变形 A_{25}

3 基于D-S 证据理论的变压器模糊综合评判模型

按照变压器部件分别精简了基础参量后, 文中建立了科学有效地变压器状态评估关键参量体系, 并以分部件的状态评估为目标层, 建立了融合 D-S 证据理论的变压器模糊综合评判模型。

3.1 分部件建立评判对象的因素集及评语集

将每个目标层分解成状态性能数据, 人工巡检项目及技术性能参数 3 个评判项目; 设为 $U_A=\{U_{A1}, U_{A2}, U_{A3}\}$ 然后在继续分解到下一级层级, 直到最后一层。如本体状态性能数据 $U_{A1}=\{U_{X1}, U_{X2}, \cdots, U_{X11}\}$ 。

变压器的状态划分根据实际情况可分为“良好”“一般”“注意”“严重”这 4 种情况, 对应的评语集表述: $V=\{\text{良好}, \text{一般}, \text{注意}, \text{严重}\}=\{\nu_1, \nu_2, \nu_3, \nu_4\}$ 。

3.2 分项指标的状态隶属度确定

对于每个层级的参量, 都要确定其对上述 4 种状态的隶属度。为了统一不同量纲, 采用相对劣化度对参量因子进行归一化, 由各个状态量的模糊隶属度函数, 将参量值转化为值域为[0, 1]的效用函数值, 具体见文[6]。

对于状态性能项目的定量指标, 文中利用三角形和半梯形组合的分布函数, 建立对应于不同状态等级的隶属函数, 分布见图 3。

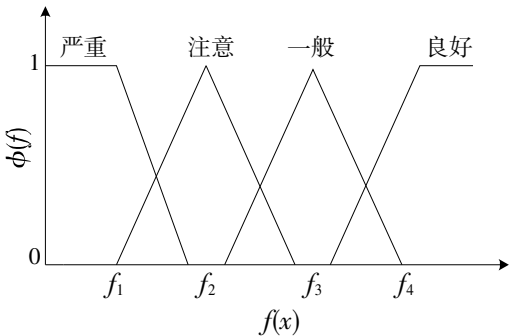


图 3 三角形和半梯形结合隶属度函数的分布
Fig. 3 Distribution of triangle and half trapezoid membership degree function

因此对于不同等级的隶属度函数见表 6。表 6 中, f 为根据各个因素检测值计算获得的效用函数, f_i ($i=1, 2, 3, 4$) 表示各个因素对于不同状态等级的效用函数界限值, 不同的因素取值也不相同, 应根据变压器状态及运行的相关准则和规程选取。

对于人工巡检及一些技术性能参数等定性指标, 采用模糊统计试验法给出权重。通过多位专家经验给出评判指标根据, 评分区分为[0, 1], 分值越大性能指标越优, 以此确定各个因素的隶属度。同时根据各位专家的技术经验水平, 对专家赋予相应

表 6 隶属度函数

Table 6 Function of membership degree		
状态划分	函数	
良好(ν_1)	$\phi(x)=$	0 $f < f_3$
		$(f-f_3)/(f_4-f_3)$ $f_3 \leq f \leq f_4$
一般(ν_2)	$\phi(x)=$	1 $f > f_4$
		$(f-f_2)/(f_3-f_2)$ $f_2 \leq f \leq f_3$
注意(ν_3)	$\phi(x)=$	$(f_4-f)/(f_4-f_3)$ $f_3 \leq f \leq f_4$
		0 $f < f_2$ 或 $f > f_4$
严重(ν_4)	$\phi(x)=$	$(f-f_1)/(f_2-f_1)$ $f_1 \leq f \leq f_2$
		$(f_3-f)/(f_3-f_2)$ $f_2 \leq f \leq f_3$
		0 $f < f_1$ 或 $f > f_3$
		1 $f < f_1$
		$(f_3-f)/(f_3-f_2)$ $f_1 \leq f \leq f_2$
		0 $f > f_2$

权重, 进行加权评分:

$$r_i = \sum_{j=1}^n r_{ij} \omega_j \quad (4)$$

式(4)中: r_i 为指标 i 的得分; r_{ij} 为第 j 位专家对指标 i 的打分; ω_j 为第 j 位专家权重; n 为专家数目, $\sum \omega_j = 1$ 。得出结果后, 再进行模糊评判。

3.3 各级评判因素权重确定

对于确定各个状态量的权重, 该模型采用层次分析法(AHP)确定主观权重, 邀请 5 位专家按 AHP 要求给出了各项目层指标间两两比较的相对重要性, 利用幂法计算权重矩阵, 并令其满足一致性检验要求, 本体的各指标权重计算结果见表 7, 具体计算过程见文[6]。

表 7 本体关键参量体系指标权重

Table 7 Weights of key parameters		
评判项目	权重	下层指标权重
A_1	0.236 3	0.029 3, 0.152 3, 0.078 6, 0.178 4,
		0.053 7, 0.018 8, 0.012 8, 0.002 8, 0.052 6, 0.178 4
A_2	0.299 0	0.062 1, 0.274 9, 0.258 9, 0.073 9, 0.330 3
A_3	0.124 7	0.281 6, 0.316 1, 0.402 3

3.4 基于 D-S 证据理论的模糊综合评判

证据理论是一种不确定性推理方法, 可依靠证据的积累, 不断地缩小假设集, 有效地融合不同的信息, 具有较强的决策处理能力。

设 Θ 为样本空间, 领域内的命题都用 Θ 的子集表示, 则基本概率分配定义如下:

设函数 $m: 2^\Theta \rightarrow [0, 1]$ (2^Θ 为 Θ 的幂集), 且满足 $m(\emptyset)=0$ 和 $\sum_{A \in \Theta} m(A)=1$, 则称函数 m 为 Θ 上基本概率赋值。 $\forall A \in \Theta, m(A)$ 称为 A 的基本可信度或 Mass 函数, 表示证据对命题 A 的支持程度^[9]。

D-S 证据理论通过一个合成公式来合成多个证

据源提供的证据,其表达式为

$$[m_1 \oplus \cdots \oplus m_n](A) = \begin{cases} 0 & A \neq \emptyset \\ K \sum_{\cap A_i = A} \prod m_j(A_i) & A \neq \emptyset \end{cases} \quad 1 \leq j \leq n.$$

式中, $K^{-1} = 1 - \sum \cap A_i = A \prod m_j(A_i)$ 。

$$\text{定义: } Bel(A_i) = \sum A_i m(A_i); \quad (5)$$

$$Pl(A_i) = Bel(A_i) + m_i(\Theta). \quad (6)$$

$Bel(A_i)$ 为 Θ 上的信度函数, 表示对 A 为真的信任程度; $Pl(A_i)$ 为似真度函数, 表示对 A 为非假的信任程度。

首先需要确定可信度因子 α 及不确定信度函数 $m_i(\Theta)$; 文中运用各项目的权重系数作为单证据体的可靠系数 α_i , 并且将指标权重最大值折算到 0.9, 合理化信度函数的取值范围。假设第 i 个证据体对第 j 个评估状态的输出值为 $b_i(j)$, 重新构造后的基本可信度函数为

$$m_i(j) = \frac{b_i(j)\alpha_i}{\sum_{j=1}^4 b_i(j)}; \quad (7)$$

$$m_i(\Theta) = 1 - \alpha_i \quad (i=1, 2, 3). \quad (8)$$

对于 $b_i(j)$ 文中选择 $B=W$ & R 加权平均型对子指标层进行综合评判^[20], 其中 W 为子指标层的权重矩阵, 见表 7。 R 为各指标对应 4 种评估状态的隶属度矩阵, 从而计算出各项目层对于不同状态的隶属度 B 。

基本可信度函数分配确定后, 根据式(5)、(6)计算出各证据单独作用时命题的信度函数与似真度函数; 再根据不同证据的信度函数, 利用 $D-S$ 合成公式, 计算出这些证据联合作用下的信度函数与似真度函数。

由以下规则确定出评估结论:

1) 评估得到的状态等级应具有最大信度函数值;
2) 评估得到状态等级的信度函数值必须大于不确定信度函数值;

3) 评估得到的状态等级与其他状态等级间的信度函数值之差必须大于某一阈值。如果阈值太小, 不能有效区分状态等级, 文中经大量调试后将其确定为 0.3;

4) 不确定信度函数值必须小于某一阈值, 否则对应证据将会因可靠性过低而无法给出评估结论, 文中将该阈值确定为 0.15。

4 实例分析

为了验证所建立关键参量体系, 运用 $D-S$ 证据理论进行状态评估方法的有效性, 以变压器电气试

验、人工检修及历史数据为例, 对其进行综合评估, 并将结果与传统的阈值打分方法^[1]相比较, 由于篇幅所限, 文中以本体的模糊评判结果为例。

4.1 实例 1

某 240 MVA、200 kV 变压器, 型号为 SFPSZ1-240000/220, 其关键参量的数据如下: 绝缘电阻吸收比 1.48, 绕组介损 0.56%, 绕组直流电阻不平衡系数 0.725%, 铁心绝缘电阻 200 MΩ, 铁心接地电流 0.037 A, 油介损 2.41%, 油击穿电压 48 kV, 油中糠醛 0.27 mg/L, 油纸聚合度 600, 油中微水含量 21 mg/L。部分油中溶解气体数据见表 8。

表 8 油中溶解气体数据

Table 8 Data of dissolved gas in oil						μL/L
H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	CO	总烃
92.1	28.0	3.2	4.8	2.2	30.6	47.9

该变压器人工巡检数据、运行及历史检修记录: 投运时间 13 年; 外观检查发现有轻微漏油现象, 本体及分接开关呼吸器硅胶变色三分之一, 冷却器表面存在脏污附着与锈蚀; 曾遭受过雷电过电压, 经历过短期急救负载。

首先对分部件的所有关键参量数据进行效用函数归一化处理, 根据对应的隶属度函数确定评估状态的隶属度; 然后依据上节计算出的各子指标层的综合权重, 计算出本体的 3 个项目层对于各评估状态的综合评估证据。由于篇幅所限, 这里以本体的模糊评判结果为例, 见表 9、10。

表 9 本体状态性能数据效用函数值及隶属度

Table 9 Data of utility value and membership degree for state performance

参量	f	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4
X_1	0.440	0	0.000	0.853 6	0.146 4
X_2	0.560	0	0.743	0.257 0	0.000 0
X_3	0.725	0	1.000	0.000 0	0.000 0
X_4	0.280	0	0.000	0.270 0	0.730 0
X_5	0.640	0	0.800	0.200 0	0.000 0
X_6	0.545	0	0.380	0.620 0	0.000 0
X_7	0.565	0	0.460	0.540 0	0.000 0
X_8	0.325	0	0.000	0.625 0	0.375 0
X_9	0.470	0	0.330	0.670 0	0.000 0
X_{10}	0.186	0	0.000	0.000 0	1.000 0
X_{11}	0.572	0	0.462	0.538 0	0.000 0

以上可以看出, 按照依据最大隶属度判定评估状态的原则, 本体通过状态性能、人工巡检、技术性能参数等项目层依据加权平均的综合模糊判断评判结果对于“一般”及“注意”状态辨识效果不明显, 无

表 10 本体模糊评判结果

Table 10 Result of fuzzy evaluation

本体	ν_1	ν_2	ν_3	ν_4
状态性能数据(A_1)	0.000 0	0.381 0	0.490 0	0.129 0
人工巡检数据(A_2)	0.052 0	0.431 0	0.517 0	0.000 0
技术性能参数(A_3)	0.000 0	0.567 0	0.433 0	0.000 0
A_1 & A_2 & A_3	0.015 5	0.423 0	0.495 9	0.075 6

法明确给出变压器本体的当前状态。

因此利用 D-S 证据理论将 3 组证据进行融合, 其中, 不确定信度函数根据各次监测数据中劣化度最大的状态因子来确定。这里以本体的组合评估结果为例, 见表 11。

表 11 各证据体融合作用的信度区间

Table 11 Reliability interval of each evidence

证据	$m(\Theta)$	$Bel(A_j), PI(A_j)$			
		ν_1	ν_2	ν_3	ν_4
A_1	0.100 0	0.000 0	0.288 9	0.531 0	0.080 1
		0.100 0	0.388 9	0.631 0	0.180 1
A_2	0.536 0	0.024 1	0.199 9	0.239 9	0.000 0
		0.560 1	0.736 0	0.775 9	0.536 0
A_3	0.808 0	0.000 0	0.107 7	0.082 3	0.000 0
		0.808 0	0.917 7	0.892 4	0.808 0
A_1 & A_2 & A_3	0.043 3	0.000 0	0.342 6	0.657 4	0.000 0
		0.043 3	0.386 0	0.700 8	0.043 3

以上结果表明, 单证据体构造基本可信度函数

后, 按照判断规则仍不能得出有效地评估结论。当证据融合以后, 随着证据体的增多, “注意”等级的置信区间最高且明显高于其他等级, 可信度区间提高至 [0.657 4, 0.700 8], 信度函数差小于 0.3, 且不确定性显著减小至 0.043 3。对其他分部件做如上判断后, 其中分接开关的“一般”状态置信区间最高, 其他部件均为“良好”。综上可见, 判断变压器处在“注意”状态等级(V_3), 需进行运行监视以及进一步的停电检修。

从实际数据中不难发现, 本体的状态性能数据中部分已经偏离最优值, 有劣化倾向, 有些甚至接近注意值。而实际情况是: 变压器外观污秽, 呼吸器硅胶变色, 分接开关有不正常噪声; 继续运行了一段时间, 发现有绝缘受潮现象, 即停电检修。

若采用传统评估导则的阈值扣分方法, 根据不同状态参量的扣分值及参量权重, 计算特征参量扣分项率、一般参量扣分项率及总的扣分项扣分率依次判定设备状态, 具体过程见文[1], 数据见表 12。表 12 中扣分项总扣分率为 13.6 分。

因此, 根据表 12 的结果, 从导则的判定规则可以推出, 变压器本体处于一般缺陷状态(ν_2), 仍可继续运行。可以看出, 基于评价导则中扣分法的评估结果滞后于变压器的实际健康状态, 这是由于传统的扣分法基于所有的变压器状态参量, 且设定的阈值没有考虑变压器历史状态评估数据的关联关系, 容易造成评估结果的偏差。

表 12 传统阈值扣分法结果

Table 12 Result of traditional threshold points method

特征参量	特征参量 扣分项率/%	一般参量	一般参量扣 分项率/%
渗漏油、噪声及振动、呼吸器、直流电阻、绕组介损、铁心绝缘、绕组频谱、短路阻抗、短路次数、泄露电流、绝缘电阻吸收比、油介损、油击穿电压、油微水、绝缘聚合度、油中溶解气体。	7.3	油位、表面锈蚀及积污、接地引下线、呼吸器、变压器过负荷、运行油温、过励磁、糖醛含量、油流带电度、红外测温。	3.2

4.2 实例 2

某 120 MVA、220 kV 变压器, 绝缘电阻吸收比 1.34, 绕组介损 0.23%, 绕组直流电阻不平衡系数 0.2%, 铁心绝缘电阻 8 000 M Ω , 铁心接地电流 0.020 A, 油介损 3.0%, 油击穿电压 40 kV, 油中糠醛 0.15 mg/L, 油纸聚合度 800, 油中微水含量 17 mg/L。部分油中溶解气体体积分数数据如下: H_2 为 100 μ L/L, CH_4 为 15 μ L/L, C_2H_2 为 3.2 μ L/L, CO 为 116.4 μ L/L, 总烃为 46.4 μ L/L。

该变压器存在偶尔过负荷运行的记录, 各部件外观无明显锈蚀及积污, 且运行正常无噪声。

依据前一个实例, 可得到对于所有关键参量数据进行证据理论融合后的综合评估结果, 见表 13。

表 13 证据体融合作用的信度区间

Table 13 Reliability interval of each evidence

证据	$m(\Theta)$	$Bel(A_j), PI(A_j)$			
		ν_1	ν_2	ν_3	ν_4
A_1	0.100 0	0.560 0	0.389 5	0.000 0	0.000 0
		0.660 0	0.489 5	0.100 0	0.100 0
A_2	0.175 0	0.373 8	0.239 1	0.000 0	0.000 0
		0.548 8	0.414 1	0.175 0	0.175 0
A_3	0.701 2	0.158 8	0.094 9	0.000 0	0.000 0
		0.860 0	0.796 1	0.701 2	0.701 2
A_1 & A_2 & A_3	0.020 5	0.684 3	0.315 7	0.000 0	0.000 0
		0.704 8	0.336 2	0.020 5	0.020 5

从证据融合的结果可以看出, 该变压器“良好”

等级的置信区间最高,为[0.684 3, 0.704 8],不确定性为0.020 5,由证据理论评估策略可知,该变压器本体处于“良好”状态等级。实际情况为:红外检测表明无严重过热现象,整体处于稳定运行状态,

若采用传统评估导则的阈值扣分方法,依据表12中各特征参量及一般参量的状态数值,可得特征参量扣分项率为0;一般参量扣分项率2.6%(低于5%);总扣分率为8分(低于10分)。各项指标均满足变压器正常状态运行情况下的数值,文中模型与传统阈值方法所得出的结论一致。

为了评估文中评估方法的性能,进一步收集了实例2中变压器的10组检验样本数据,基于提取的关键参量体系进行综合状态评估,得出9组的健康状态与实际情况一致。

综上,可见文中提出的关键参量体系和D-S证据理论的评价方法是有效可行的,其状态评价结果与变压器真实运行状态一致,并在某些情况下优于现有导则中的阈值判定方法。

5 结语

文中基于因子分析法所提取的变压器状态评估关键参量体系具有较强的可操作性,相较于传统方法,精简了指标体系,提高了评估效率;在用层次分析法计算指标常权的基础上,构建了基于D-S证据理论的多层次模糊综合评判模型,对多因素进行了融合评估决策。实例分析表明,所提模型对变压器的运行状态辨识效果明显,更接近真实运行状态。

参考文献:

- [1] 国家电网公司生产技术部 Q/GDW 169—2011 油浸式变压器(电抗器)状态评价导则[S]. 北京:中国电力出版社,2011.
Production and Technology Department of State Grid. Q/GGDW 169—2011 Guide for condition evaluation of oil-filled transformer(reactor)[S]. Beijing:China Electric Power Press,2008.
- [2] 骆思佳,廖瑞金,王有元,等. 带变权的电力变压器状态模糊综合评判[J]. 高电压技术,2007,33(8):106-110.
LUO Sijia, LIAO Ruijin, WANG Youyuan, et al. Fuzzy synthetic evaluation of power transformer condition with variable weights [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33 (8):106-110.
- [3] 国家电网公司. 输变电设备标准缺陷知识库[S]. 2011.
State Grid. Standard defects knowledge base of power transmission and transformer equipment[S]. 2011.
- [4] 王 谦. 基于模糊理论的电力变压器运行状态综合评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2007.
- WANG Qian. Study of the comprehensive assessment method for power transformer condition in service with fuzzy theory[D]. Chongqing:Chongqing University, 2007.
- [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.
LIAO Ruijin, WANG Qian, LUO Sijia, et al. Condition assessment model for power transformer in service based on fuzzy synthetic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3):70-75.
- [6] 朱承治,郭创新,孙 旻,等. 基于改进证据推理的变压器状态评估研究[J]. 高电压技术,2008,34(11):2332-2337.
ZHU Chengzhi, GUO Chuangxin, SUN Min, et al. Power transformer condition assessment based on improved evidential reasoning [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34 (11):2332-2337.
- [7] 李 黎,张 登,谢龙君,等. 采用关联规则综合分析和变权重系数的电力变压器状态评估方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(24):152-159.
LI Li, ZHANG Deng, XIE Longjun, et al. A condition assessment method of power transformers based on association rules and variable weight coefficients [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(24):152-159.
- [8] 熊 浩,孙才新,张 昀,等. 电力变压器运行状态的灰色层次评估模型[J]. 电力系统自动化,2007,31(7):55-60.
XIONG Hao, SUN Caixin, ZHANG Yun, et al. Ahierarchical grey evaluation model for operation condition of power transformers [J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7):55-60.
- [9] 薛 敏,韩富春. 基于灰色理论的电力变压器运行状态评估[J]. 电气技术,2010(6):21-23.
XUE Min, Han Fuchun. Condition Assessment for power transformer based on grey system theory [J]. Electrical Technology, 2010(6):21-23.
- [10] 国连玉,李可军,梁永亮,等. 基于灰色模糊综合评判的高压断路器状态评估[J]. 电力自动化设备,2014,34(11):161-167.
GUO Lianyu, LI Kejun, LIANG Yongliang, et al. HV circuit breaker state assessment based on gray-fuzzy comprehensive evaluation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(11):161-167.
- [11] 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.
ZHAO Wenqing, ZHU Yongli, JIANG Bo, et al. Condition assessment for power transformers by bayes network [J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5):1032-1039.
- [12] 梁永亮,李可军,牛 林,等. 变压器状态评估多层次不确定模型[J]. 电力系统自动化,2013,37(2):74-78

(下转第22页)

- [16] ZHAO Feng, SUN Qiao, ZHAN Jingyu. The real-time database application in transformer substation hotspot monitoring system[C]//2014 16th International Conference on Advanced Communication Technology (ICACT). [S.l.]: IEEE, 2014: 941-944.
- [17] 段海新, CN B E, 杨家海, 等. 基于 Web 和数据库的网络管理系统的设计与实现[J]. 软件学报, 2000(4): 468-472. DUAN Haixin, CN B E, YANG Jiahai, et al. Design and implementation of a network management system based on web and database[J]. Journal of Software, 2000(4): 468-472.
- [18] 黄新波, 王娅娜, 刘 林, 等. 变压器油色谱在线监测中 BP 神经网络算法分析[J]. 陕西电力, 201, 41(6): 56-60. HUANG Xinbo, WANG Yana, LIU Lin, et al. Application of back propagation neural network in dissolved gas analysis based on transformer oil chromatographic on-line monitoring[J]. Shaanxi Electric Power, 201, 41(6): 56-60.
- [19] 曾 鸣, 黄立新, 邱柳青, 等. 基于连续蚁群优化算法的输变电设备检修决策模型[J]. 华东电力, 2012, 40(6): 1007-1011. ZENG Ming, HUANG Lixin, QIU Liuqing, et al. Transmission maintenance decision-making model based on ant colony optimization algorithm for continuous domains[J]. East China Electric Power, 2012, 40(6): 1007-1011.
- [20] 马叶芝, 焦彦军, 王东升. 变压器故障诊断中溶解气体的 PSO-WFCM 算法研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 72-76. MA Yezhi, JIAO Yanjun, WANG Dongsheng. Detection of dissolved gas with PSO-WFCM algorithm for fault diagnosis of power transform[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 72-76.
- [21] 钱 羽, 胡邦喜, 叶 辉, 等. 故障智能诊断数据库设计与应用[J]. 机械设计与制造, 2008(2): 16-18.
- QIAN Yu, HU Bangxi, YE Hui, et al. Database design in Intelligent fault diagnosis and application in tangshan steel cold rolling mill[J]. Machinery Design & Manufacture, 2008(2): 16-18.
- [22] 郭 伟, 杨江平, 徐晨曦. 一种面向对象的故障诊断数据库设计[J]. 计算机工程与应用, 1999(10): 90-92. GUO Wei, YANG Jiangping, XU Chenxi. An object-oriented design technique of trouble shooting database [J]. Computer Engineering and Applications, 1999(10): 90-92.
- [23] 高吉普, 张沛超, 何 旭, 等. 智能变电站保护系统可靠性的自动分析方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(15): 107-112. GAO Jipu, ZHANG Peichao, HE Xu, et al. An automatic reliability analysis method for protection systems in smart substations[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(15): 107-112.
- [24] 高吉普, 徐长宝, 戴 宇, 等. 交换机端口安全策略在智能变电站中的应用研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(13): 117-122. GAO Jipu, XU Changbao, DAI Yu, et al. Research on application of switch port access control in smart substation [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 117-122.

黄新波(1975—),男,教授,博士后,研究方向为智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术的研究。

张 瑜(1988—),女,硕士研究生,研究方向为智能电网输变电设备在线监测理论与关键技术的研究。

朱 波(1975—),男,工程师,主要研究方向为计算机管理信息系统。

(上接第 14 页)

- LIANG Yongliang, LI Kejun, NIU Lin, et al. A multilayer uncertain transformer condition assessment model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(2): 74-78.
- [13] 熊 浩, 孙才新, 杜 鹏, 等. 基于物元理论的电力变压器综合状态评估[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2006, 29(10): 24-28. XIONG Hao, SUN Caixin, DU Peng, et al. Synthetic assessment of power transformer condition based on matter-element theory[J]. Journal of Chongqing University(Natural Science Edition), 2006, 29(10): 24-28.
- [14] 杨丽徒, 于发威, 包 毅, 等. 基于物元理论的变压器绝缘状态分级评估[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(6): 55-58. YANG Lixi, YU Fawei, BAO Yi, et al. Classification evaluation of transformer insulation condition based on matter-element theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(6): 55-58.
- [15] 徐 智. 电力变压器分层分部件状态评估研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2013. XU Zhi. The study on hierarchy and sub-unit condition assessment of power transformer[D]. Chongqing: Chongqing University, 2013.
- [16] 南方电网公司. 一次设备标准缺陷知识库[S]. 2007 China Southern Power Grid. Standard defects knowledge base of primary equipment[S]. 2007.
- [17] 何晓群. 多元统计分析[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2002. HE Xiaqun. Multivariate statistical analysis[M]. Beijing: Renmin University of China Press, 2002.
- [18] 罗玉波. 关于因子分析用于综合排名的一个注记[J]. 西南大学学报(自然科学版), 2013, 35(4): 106-110. LUO Yubo. A note on application of factor analysis in ranking analysis[J]. Journal of Southwest University(Natural Science Edition), 2013, 35(4): 106-110.
- [19] TANG W H, SPURGEON K, WU Q H, et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(4): 1696-1703.
- [20] 彭祖赠. 模糊数学及其应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2007: 90-95. PENG Zuzeng. Fuzzy mathematics and its applications[M]. Wuhan: Wuhan University Press, 2007: 90-95.
- 曾丹乐(1990—),女,硕士研究生,主要从事基于海量数据的输变电设备状态评估与缺陷诊断方向的研究。