

基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器 状态判别和预警

石少伟¹,王 可¹,陈 力²,杨丰阁¹,刘 沛¹,陶 丹¹,吕国峰¹

(1. 武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072;2. 中国电力科学研究院,湖北 武汉 430074)

摘要: 作为智能配电网的重要设备之一,电力变压器运行状态的准确判别和预警有重要意义。全面分析电力变压器状态量,建立由油色谱、电气试验、绝缘油试验、附件运行状况4个一级指标和18个二级指标组成的电力变压器状态评价指标体系。建立基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别和预警模型。实例证明该模型能准确高效地判别变压器的工作状态并提出相应的预警和检修计划。

关键词: 电力变压器; 状态判别; 模糊综合评价; 贝叶斯判别; 模型; 预警

中图分类号: TM 41

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.09.009

0 引言

经济社会的快速发展对电力安全性和电能质量提出了越来越高的要求。以分布式数据传输、计算和控制技术以及数据传输技术为基础的智能电网为电力系统在安全可靠、优质高效、绿色环保方面开辟了广泛的发展空间^[1]。作为智能电网重要的组成部分,智能配电网实时掌握电网的运行状态,对电网运行状态和负荷分配进行精确管理,对电力设备故障进行及时的判断和检修,保证配电网安全和供电的可靠性^[2-3]。电力变压器作为电力系统输电和配电中的核心设备,它的运行状态和健康程度直接影响着配电网的安全稳定运行。变压器的故障判断和及时预警是智能配电系统风险评估和安全预警技术的重要内容。

电力变压器状态信息量有很多,从不同的角度和层次上反映了变压器的运行状态。因此,建立合理的变压器状态评估模型对变压器的故障进行评估预警具有重要的意义^[4]。国内外已有一些专家学者对电力变压器的故障判别和预警^[5-6]做出了研究。其中,一些学者将综合评价算法引入电力变压器状态评估中,采用模糊评价的方法对不同的评价指标进行规范化处理和隶属度计算,最终得出综合评价结果并提出相应的预警建议^[7]。文献[8]采用灰色层次评估模型定量分析了不同状态变量之间的关联程度并对变压器的绝缘程度进行评估。文献[9]引入神经网络对变压器故障进行分类识别,但是存在训练时间长、识别准确度较低的问题,难以适应智能配电系统快速风险评估预警的需求。文献[10]将半监督分类的方法引入变压器的故障诊断中,准确度较高,但是存在主观性强、对于样本的选择和评价工作耗费严重的问题。文献[11]采用3层贝叶

斯(Bayes)网络的方法对电力变压器进行综合故障诊断,通过概率模型来确定变压器的故障风险,取得了不错的效果。文献[12]依据变压器油气参数作为故障诊断依据,并通过遗传算法对支持向量机参数进行优化,通过分步式的评价算法对变压器故障进行诊断,提高了判断的准确率。但是收敛速度比较慢,对于训练样本准确度的依赖较高。文献[13]建立了遗传算法和粒子群优化算法混合优化的聚类模型对电力变压器的故障进行诊断,收敛速度较快,但是诊断的准确度不是很高,可能造成误判。文献[14]针对模糊C均值聚类算法用于溶解气体成分分析时遇到的问题,将加权模糊核聚类方法引入电力变压器故障诊断中,利用基于样本相似度的加权方法对样本进行特征加权,映射到高维空间进行模糊聚类。该模型考虑了不同状态量对变压器运行的不同影响,提高了故障诊断的正确率,但是该方法比较复杂,难以适应电力变压器故障的快速诊断和预警要求。

上述判别方式存在2个缺点:第一是判别方法与2个判别总体各自出现的概率大小完全无关;第二是判断方法与错判之后造成的损失无关。贝叶斯判别法既考虑了各个总体出现的先验概率,又考虑了错判造成的损失,其判别效果更加理想,应用更加广泛。

本文引入贝叶斯判别法对电力变压器进行故障判别和预警,提出了电力变压器状态评价体系,建立了基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别模型,求得判别结果并进行了验证。算例证明该模型可以有效判别电力变压器的工作状态并做出预警。

1 电力变压器状态量选择及状态划分

1.1 状态量选取的原则

电力变压器是一个非常复杂的系统,表征其状态的状态变量众多,且多数具有不确定性和模糊性,因

此对变压器运行状态进行准确、有效的评价存在一定的困难。我国 DL/T 596—1996《电力设备预防性试验规程》中规定了变压器进行检查、试验、监测需要做的 32 个常规试验项目、12 个变压器油试验项目和 5 个变压器套管试验项目。但是规程中所包含的信息量非常庞大,难以适应智能配电系统快速评价、及时反馈的要求;另一方面,不同的评价指标反映了变压器的同一状态。所以全面并高效地选取变压器典型状态量是合理高效评价电力变压器状态的前提。电力变压器状态变量的选取原则^[15]如表 1 所示。

表 1 电力变压器状态变量选取原则
Table 1 Selection principles of power transformer status variables

原则	含义
科学性原则	指标选取遵循研究对象发展的客观规律
可行性原则	指标简洁实用,便于实测获取
全面性原则	指标体系能够全面反映其运行状态
系统和层次	指标体系由不同层次和因素组成
定性和定量	定性描述和定量评估相结合

1.2 状态评价体系

依据上述状态变量选取的原则,建立了电力变压器状态评价体系。选取油色谱指标、电气试验指标、绝缘油试验指标和附件运行状况 4 个指标作为一级指标。选取乙炔含量等 18 个指标作为二级指标。电力变压器状态评价指标体系如图 1 所示。

目前电力变压器几乎全是采用油浸纸绝缘结构,用绝缘油进行绝缘和散热。随着运行时间的增长,固体绝缘材料会在电和热的作用下逐渐老化分解,会逐渐产生少量的低分子烃类以及一氧化碳、二氧化碳等特征气体。当变压器内部出现局部放电、过热等故障时这种现象会加剧。对于不同类型的电力变压器故障,所产生的特征气体各种成分比例、浓度都有一定的差异。因此,通过油色谱分析来分析变压器内部气体的成分、浓度和产气速率是电力变压器重要的监测手段。电力变压器油中溶解气体含量注意值如表 2 所示。

气体的绝对产气速率即每运行日产生某种气体的平均值,计算方式如下:

$$\gamma_a = \frac{C_2 - C_1}{\Delta t} \frac{K}{\rho}$$

其中, γ_a 为绝对产气速率; C_1 为第一次取样测得油中某气体的浓度 ($\mu\text{L/L}$); C_2 为第二次取样测得油中某气体的浓度 ($\mu\text{L/L}$); Δt 为 2 次取样时间间隔中的实际运行天数 (d); K 为设备总的油量 (t); ρ 为油的密度 (t/m^3)。电力变压器绝对产气速率的注意值如表 3 所示。

电力变压器内部结构复杂,电场和热场分布不

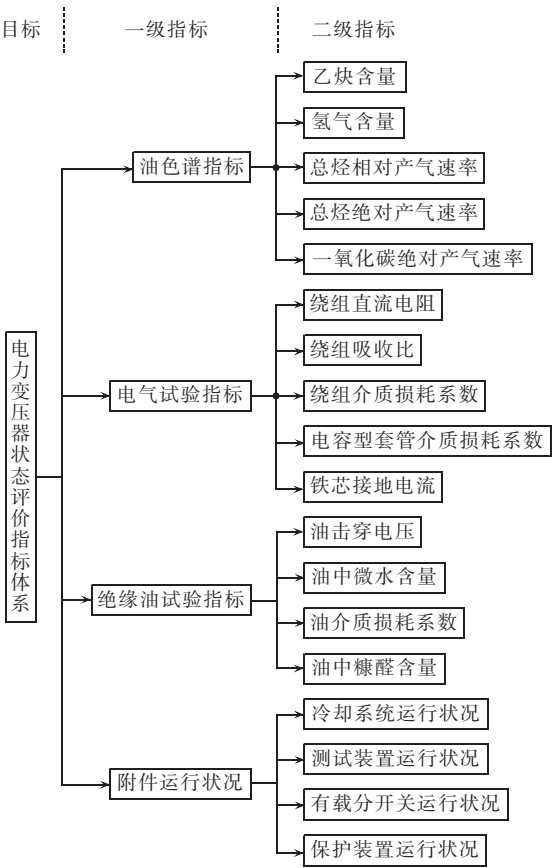


图 1 电力变压器状态评价指标体系
Fig.1 Power transformer status evaluation index system

表 2 电力变压器溶解气体含量注意值
Table 2 Critical content of dissolved gases in power transformer

气体成分	含量/($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	
	220 kV 及以下	330 kV 及以上
总烃	150	150
乙炔	5	1
氢气	150	150

表 3 绝对产气速率的注意值
Table 3 Critical increase rate of dissolved gases in power transformer

气体成分	绝对产气速率注意值/($\text{mL}\cdot\text{d}^{-1}$)	
	开放式	隔膜式
总烃	6	12
乙炔	0.1	0.2
一氧化碳	50	100
氢气	5	10

均,事故率相对于智能配电网其他设备较高。基于 2008 年国家电网公司颁布的《设备状态检修规章制度和技术标准汇编》的要求,新变压器投运满一年以及停运 6 个月,应当进行例行试验。例行试验是指为了获取设备状态量、评估设备状态、及时发现故障隐患,定期进行的各种带电检测和停电试验。因此选取电气试验的相关状态量作为评价指标如表 4 所示。

电力变压器的绝缘油一方面作为内绝缘的介质使得绕组之间、铁芯、箱壳间有良好的绝缘;另一方

表 4 电气试验指标
Table 4 Indexes of electrical test

指标	含义	要求
绕组直流电阻	用于考察绕组纵绝缘和电流回路连接状况	相间差别不应大于三相平均值的 1%, 温度变化不大于 2%
绕组吸收比	用于检验绝缘的局部和整体缺陷	吸收比 (10~30℃) 不低于 1.3
绕组介质损耗系数	用于反映变压器的整体受潮、油脂劣化、贯穿性放电通道、有气隙放电等缺陷	介质损耗系数不大于 0.8%, 并且其历年数值不应有显著变化
电容型套管介质损耗系数	用于判断套管绝缘性能	介质损耗系数不大于 0.8%
铁芯接地电流	防止铁芯多点接地形成环流	一般不大于 100 mA 并且与历史测试数据差距不明显

面作为散热的介质发挥作用。因此对绝缘油的监测有重要的意义。绝缘油试验评估指标如表 5 所示。

表 5 绝缘油试验评估指标
Table 5 Evaluation indexes of insulating oil test

指标	含义	要求
油击穿电压	衡量绝缘油耐受电压能力的尺度	不应小于 35 kV
油中微水含量	降低击穿电压、增加介质损耗和酸值,使油质裂化	含量不大于 25 mg/L
油介质损耗系数	反映变压器油在电场、氧化、高温作用下的老化程度	介质损耗系数不大于 0.04
油中糠醛含量	表征固体绝缘材料的老化程度	含量达到 0.5 mg/L 时处于寿命中期,1~2 mg/L 时劣化严重,达到 4 mg/L 时绝缘失效

电力变压器的附件主要包括冷却系统、测试装置、有载分接开关和保护装置。这些附件的运行状况也会影响到电力变压器的运行状态。冷却系统可以确定变压器的温度保持在允许的范围内;测试装置主要包括油位计、温度计和电流互感器,许多测试信息都需要从测试装置中监测得出,它的可靠运行很重要;有载分接开关是变压器完成有载调压的关键部位,需要避免其出现弹簧脱落、老化、机械卡涩、转轴断裂等故障;保护装置主要包括储油柜、吸湿器、压力释放阀和气体继电器等,这些设备的可靠运行对于变压器的运转有重要意义。依据电力变压器附件实际运行状态和工作人员检修经验对电力变压器附件运行状况进行评估,如表 6 所示。

1.3 状态划分及量化

本文采用 1 分制的评分方式对电力变压器的各项指标做出评估。电力变压器状态划分及预警如表 7 所示。

本文采用半梯模型对配电线路状态信息进行量

表 6 附件运行状况评估
Table 6 Operating status evaluation of accessories

指标	运行状态	
	得分 0~0.5	得分 0.51~1
冷却系统运行状况	轻微噪音和振动,无漏油现象,较少污垢	严重噪音、振动,有漏油现象,较多污垢
测试装置运行状况	测试准确,设备完备	测试有偏差,设备有缺损
有载分接开关运行状况	接触良好,轻微老化	接触不良,老化严重
保护装置运行状况	密闭良好,无堵塞、损坏,动作可靠	密闭不良,有堵塞、损坏,动作不可靠

表 7 电力变压器状态划分及预警
Table 7 Statuses and warnings of power transformer

得分	状态	检修方式	检修周期
0~0.2	正常	不停电检修	正常周期或延期
0.21~0.4	注意	常规检修	不大于正常周期
0.41~0.7	异常	局部检修	适时安排
0.71~1	严重	整体检修	立即检修

化。半梯模型包括升半梯模型和降半梯模型。对于数值越大越好的状态量采用升半梯模型,反之采用降半梯模型。为了方便后续计算,将量化数据做同向化处理,即量化结果均位于[0,1]区间内,并且数值越小,对应的状态运行状况越好。

升半梯评分模型的表达式为:

$$y(m)=\begin{cases}0 & 0\leq m<a \\ \frac{m-a}{b-a} & a\leq m<b \\ 1 & m\geq b\end{cases}$$

降半梯评分模型的表达式为:

$$y(m)=\begin{cases}1 & 0\leq m<a \\ 1-\frac{m-a}{b-a} & a\leq m<b \\ 0 & m\geq b\end{cases}$$

其中,a、b 为模型阈值;m 为量化参数量值。各状态量的阈值和参数量值依据相关规定和检修经验设定,见 1.2 节。

2 电力变压器状态判别模型

2.1 电力变压器模糊综合评价

模糊综合评价^[16]以模糊集合论为基础,是一种对多种模糊因素或受模糊因素影响的事物或现象进行评价的方法。模糊关系合成可以量化一些边界不清、主观性强的因素,并且可以从多个因素对被评价事物隶属等级状况进行综合性评价。模糊综合评价的评价结果清晰,系统性强,对于各种非确定性问题的解决具有良好效果。

电力变压器状态双层模糊综合评价的步骤如下。

a. 建立模糊评价状态变量集 U。U 为变压器一级指标组成的集合。U={u_i} (i=1,2,3,4),其中 u_i(i=

1,2,3,4)分别代表油色谱指标、电气试验指标、绝缘油试验指标、附件运行状况4个一级指标。每一个一级指标又由相应的二级指标组成。图1所示的18个二级指标分别用 $v_j(j=1,2,\dots,18)$ 表示。

b. 建立权重集 W 。权重集是状态变量集中4个一级指标的归一化权值, $W=\{w_1,w_2,w_3,w_4\}$,要求权值满足非负性和归一性,即 $w_i\geq 0(i=1,2,3,4)$ 且 $\sum_{i=1}^4 w_i=1$ 。每个一级指标的评估值又由相应的二级指标赋权求得。18个二级指标的权值分别用 $k_j(j=1,2,\dots,18)$ 来表示,并且满足:

$$\begin{aligned} k_j &\geq 0 \quad j=1,2,\dots,18 \\ \sum_{j=1}^5 k_j &= 1 \quad j=1,2,\dots,5 \\ \sum_{j=6}^{10} k_j &= 1 \quad j=6,7,\dots,10 \\ \sum_{j=11}^{14} k_j &= 1 \quad j=11,12,13,14 \\ \sum_{j=15}^{18} k_j &= 1 \quad j=15,16,17,18 \end{aligned}$$

c. 建立评估集 V 。评估集包括对各状态量及其子状态量的评估。电力变压器运行状态评估集由4类状态构成:正常、注意、异常、严重。

d. 建立隶属度矩阵。在状态变量集、权重集和评估集建立后,建立一个从 U 到 V 的模糊关系,导出单因素模糊隶属度 D 。

e. 双层模糊综合评价的求解。电力变压器状态双层模糊综合评价求解是对一系列变量加权求和的过程。

$$\begin{aligned} D &= \sum_{i=1}^4 w_i u_i \quad i=1,2,3,4 \\ u_1 &= \sum_{j=1}^5 k_j v_j \quad j=1,2,\dots,5 \\ u_2 &= \sum_{j=6}^{10} k_j v_j \quad j=6,7,\dots,10 \\ u_3 &= \sum_{j=11}^{14} k_j v_j \quad j=11,12,13,14 \\ u_4 &= \sum_{j=15}^{18} k_j v_j \quad j=15,16,17,18 \end{aligned}$$

其中, D 为单因素模糊隶属度; $w_i(i=1,2,3,4)$ 为4个一级指标权重值; $k_j(j=1,2,\dots,18)$ 为18个二级指标权重值。

f. 评估结果分析。通过对隶属度 D 的判断可以得出电力变压器的隶属度。依据隶属度确定电力变压器的工作状态和相应的检修计划。

2.2 贝叶斯判别

贝叶斯判别的基本思想是认为所有 G 个类别都是空间中互斥的子域,每个观测都是空间中的一个点。在考虑先验概率的前提下,利用贝叶斯公式按照

一定准则构造一个判别函数,分别计算该样品落入各个子域的概率,所有概率中最大的一类就被认为是该样品所属的类别^[17]。

为了判断电力变压器状态评估的准确性,建立基于贝叶斯判别法的状态判别模型。

设有 k 个总体 $G_1, G_2, \dots, G_k$,其 p 维分布密度函数分布为 $f_1(\mathbf{x}), f_2(\mathbf{x}), \dots, f_k(\mathbf{x})$,各总体出现的先验概率分布为 $q_1, q_2, \dots, q_k$,且 $\sum_{i=1}^k q_i=1$,对于样品 $\mathbf{x}=[x_1 \ x_2 \ \dots \ x_p]^T$,需判定 $\mathbf{x}$ 归属哪一个总体。把 $\mathbf{x}$ 看成是 p 维欧氏空间 $\mathbf{R}^p$ 的一个点,那么,贝叶斯判别规则期望对样本空间实现一个划分: $R_1, R_2, \dots, R_k$,该划分既考虑各总体出现的概率又考虑使误差的可能性最小,这个划分就成了一个判别规则,即若 $\mathbf{x}$ 落入 $R_i(i=1,2,\dots,k)$,则 $\mathbf{x} \in G_i$ 。

根据贝叶斯公式,样品 $\mathbf{x}$ 来自 G_i 的条件概率(后验概率)为:

$$P(G_i | \mathbf{x}) = \frac{q_i f_i(\mathbf{x})}{\sum_{j=1}^k q_j f_j(\mathbf{x})}$$

若 $\mathbf{x}$ 属于 G_i ,而被误判为 $G_j(i \neq j)$ 的概率为 $1 - P(G_i | \mathbf{x})$ 。当因误判而产生的损失函数为 $L(j | i)$ 时,误判的平均损失为:

$$E(i | \mathbf{x}) = \sum_{j \neq i} \left[\frac{q_j f_j(\mathbf{x})}{\sum_{j=1}^k q_j f_j(\mathbf{x})} L(j | i) \right]$$

它表示了本属于第 i 个总体的样品被误判为属于第 j 个总体的损失。判别一个样品属于哪一类,自然既希望属于这一类的后验概率大,又希望误判为这一类的平均损失小。实际应用中确定损失函数比较困难,故常假设各种误判损失一样。此时,使 $P(G_i | \mathbf{x})$ 最大与使 $E(i | \mathbf{x})$ 最小是等价的。这样,建立判别函数就只需使 $P(G_i | \mathbf{x})$ 最大,它等价于应使 $q_i f_i(\mathbf{x})$ 最大,故判别函数为:

$$y_i(\mathbf{x}) = q_i f_i(\mathbf{x}) \quad i=1,2,\dots,k$$

判别规则为:当 $\mathbf{x}$ 落入 R_i ,则 $\mathbf{x} \in G_i$,其中 $R_i = \{\mathbf{x} | y_i(\mathbf{x}) = \max_{1 \leq j \leq k} y_j(\mathbf{x})\}$,即对于 $\mathbf{x}$,若 $y_i(\mathbf{x}) = \max_{1 \leq j \leq k} y_j(\mathbf{x})$,则 $\mathbf{x} \in G_i$ 。

当 $G_i \sim N(\boldsymbol{\mu}_i, \boldsymbol{\Sigma}_i)$ 时,有:

$$y_i(\mathbf{x}) = q_i (2\pi)^{-\frac{p}{2}} |\boldsymbol{\Sigma}_i|^{-\frac{1}{2}} \exp \left[-\frac{1}{2} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i)^T \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} (\mathbf{x} - \boldsymbol{\mu}_i) \right]$$

令 $Z_i(\mathbf{x}) = \ln[(2\pi)^{-\frac{p}{2}} y_i(\mathbf{x})]$,则判别函数为:

$$\begin{aligned} Z_i(\mathbf{x}) &= \ln q_i - \frac{1}{2} \ln |\boldsymbol{\Sigma}_i| - \frac{1}{2} \mathbf{x}^T \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} \boldsymbol{\mu}_i - \\ &\quad \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}_i^T \boldsymbol{\Sigma}_i^{-1} \boldsymbol{\mu}_i \quad i=1,2,\dots,k \end{aligned} \quad (1)$$

判别规则为:若 $Z_i(\mathbf{x}) = \max_{1 \leq j \leq k} Z_j(\mathbf{x})$,则 $\mathbf{x} \in G_i$ 。

这时后验概率为:

$$P(G_i | \mathbf{x}) = \frac{\exp[Z_i(\mathbf{x})]}{\sum_{j=1}^k \exp[Z_j(\mathbf{x})]}$$

当 $\Sigma = \Sigma_1 = \Sigma_2 = \dots = \Sigma_k$ 时, 由于上述判别函数式 (1) 中第 2、第 3 项与 i 无关, 故判别函数可简化为式 (2), 而判别规则不变。

$$Z_i(\mathbf{x}) = \ln q_i + \mathbf{x}^T \Sigma_i^{-1} \boldsymbol{\mu}_i - \frac{1}{2} \boldsymbol{\mu}_i^T \Sigma_i^{-1} \boldsymbol{\mu}_i \quad i=1, 2, \dots, k \quad (2)$$

可以证明, 当 $k=2$ 时, 若 $q_1=q_2$ 且两总体的误判概率相等时, 贝叶斯判别与距离判别等价。

2.3 变压器状态判别预警系统

结合 2 种方法的优点, 建立了基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别和预警模型。该模型的判断过程如图 2 所示。

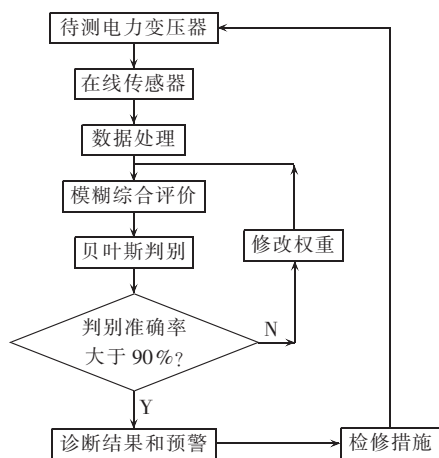


图 2 电力变压器状态判别预警系统

Fig.2 Power transformer status discrimination and warning system

具体的评估步骤如下。

a. 对于待测样本进行在线监测, 取得电力变压器各项指标的测量值。

b. 对测量结果进行初始化处理并依据状态评价体系进行量化。

c. 依据变压器模糊综合评价模型求得样本集的评价结果。

d. 依据模糊综合评价模型的评估结果, 采用贝叶斯判别模型计算样本判别的正确率, 如果正确率高于 90%, 则依据模型输出结果; 如果正确率低于 90%, 则返回步骤 b, 更新指标权重, 改进模型评价模型。

e. 依据诊断结果, 确定电力变压器运行状态并提出相应的预警建议。

f. 依据步骤 e 得出的结果进行检修。

3 实例验证

选取 16 组电力变压器监测样本进行研究。依据本文建立的电力变压器指标评估体系对每一个样本的 18 个二级评估指标进行量化。依据变压器模

糊综合评价模型求得样本集的评价结果, 分为正常、注意、异常、严重 4 个状态组, 依次用 1、2、3、4 标记。依据经验和专家判断, 选取一级指标权重 $W = \{0.3, 0.3, 0.2, 0.2\}$ 。依据变压器状态模糊综合评价模型求得样本集的评价结果, 如表 8 所示。

表 8 变压器状态模糊综合评价结果

Table 8 Results of fuzzy comprehensive evaluation of power transformer status

样本	u_1	u_2	u_3	u_4	D	状态组
1	0.25	0.09	0.12	0.15	0.156	1
2	0.15	0.12	0.21	0.28	0.179	1
3	0.14	0.32	0.15	0.22	0.212	1
4	0.11	0.05	0.14	0.15	0.106	1
5	0.31	0.25	0.35	0.42	0.322	2
6	0.10	0.45	0.13	0.15	0.221	2
7	0.56	0.32	0.21	0.12	0.330	2
8	0.34	0.82	0.15	0.20	0.418	3
9	0.95	0.45	0.62	0.55	0.654	3
10	0.65	0.75	0.34	0.46	0.580	3
11	0.35	0.83	0.75	0.28	0.560	3
12	0.48	0.65	0.53	0.52	0.549	3
13	0.91	0.83	0.78	0.84	0.846	4
14	0.88	0.75	0.77	0.25	0.693	3
15	0.65	0.37	0.85	0.72	0.620	3
16	0.78	0.84	0.68	0.76	0.774	4

采用贝叶斯判别模型对变压器状态模糊综合评价的结果进行判别。各个状态组的先验概率如表 9 所示。

表 9 状态组先验概率

Table 9 Prior probability of status groups

状态组	先验概率	用于分析的样本	
		未加权的样本	已加权的样本
1	0.25	4	4
2	0.25	3	3
3	0.25	7	7
4	0.25	2	2
合计	1	16	16

依据贝叶斯判别模型, 计算贝叶斯判别系数如表 10 所示。

表 10 贝叶斯判别函数系数

Table 10 Coefficients of Bayes classification function

状态量	贝叶斯判别系数			
	状态组 1	状态组 2	状态组 3	状态组 4
u_1	12.325	24.180	44.971	63.505
u_2	40.779	74.044	142.360	203.079
u_3	2.512	4.667	14.507	14.061
u_4	32.151	52.166	97.062	150.369
常数	-8.754	-24.419	-86.993	-178.282

依据表 10 可知 4 种状态的贝叶斯判别函数如下。

正常状态:

$$F_1 = -8.754 + 12.325 u_1 + 40.779 u_2 + 2.512 u_3 + 32.151 u_4$$

注意状态:

$$F_2 = -24.419 + 24.18 u_1 + 74.044 u_2 + 4.667 u_3 + 52.166 u_4$$

异常状态:
 $F_3=-86.993+44.971u_1+142.36u_2+14.507u_3+97.062u_4$
严重状态:
 $F_4=-178.282+63.505u_1+203.079u_2+14.061u_3+150.369u_4$

将样本的一级指标值代入上述 4 个贝叶斯判别函数,求得 4 个函数值,哪个函数值最大,则该样本所处的状态即判入该类。16 组变压器状态监测样本的判别结果如表 11 所示。

表 11 样本判别结果
Table 11 Results of sample discrimination

样本	状态判别分组		后验概率
	模糊综合评价	贝叶斯判别	
1	1	1	0.998
2	1	1	0.979
3	1	2#	0.797
4	1	1	1.000
5	2	2	0.996
6	2	2	0.978
7	2	2	0.989
8	3	3	1.000
9	3	3	1.000
10	3	3	1.000
11	3	3	1.000
12	3	3	1.000
13	4	4	1.000
14	3	3	1.000
15	3	3	1.000
16	4	4	1.000

注:# 为误判案例。

由状态判别的结果可知,样本 1—4 处于正常运行状态;样本 5—7 处于注意状态;样本 8—12、14、15 处于异常状态;样本 13、16 处于严重状态。电力变压器状态判别中出现 1 次误判,正确率为 93.75%,满足误差要求,证明所建立的基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别模型可以准确判断电力变压器的状态。

通过该模型对 4 组待判样本进行判别,结果如表 12 所示。

表 12 变压器状态判别结果
Table 12 Results of power transformer status discrimination

样本	u_1	u_2	u_3	u_4	状态组	后验概率
17	0.15	0.08	0.18	0.23	1	0.998
18	0.32	0.35	0.22	0.28	2	0.997
19	0.46	0.54	0.65	0.42	3	1.000
20	0.82	0.74	0.83	0.72	4	0.999

由判别结果可知,样本 17 处于正常运行状态,建议采用不停电检修的方式,或可延期检修;样本 18 处于注意状态,建议按照正常的检修周期进行常规检修;样本 19 处于异常状态,建议适时安排局部检修;样本 20 处于严重状态,建议立即进行整体检修。

综上,本文建立的基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别和预警模型能够准确高效地判别变压器的运行状态并提出相应的检修建议,为运行检修工作人员合理安排工作提供参考。

4 结论

本文引入贝叶斯判别法对电力变压器进行故障判别和预警,提出了电力变压器状态评价体系,建立了基于模糊综合评价和贝叶斯判别的电力变压器状态判别模型,求得判别结果并进行了验证。该方法准确高效,可以有效判别电力变压器的工作状态并做出预警,为电力系统运行检修工作人员合理安排工作提供一定的参考。贝叶斯判别分析可以进一步推广应用到其他电力设备状态评估和在线预警工作中。

参考文献:

[1] 吴国沛,刘育权. 智能配电网技术支持系统的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制,2010,38(21):162-166,172.
WU Guopei,LIU Yuquan. Research and application of technology support system for smart distribute grid[J]. Power System Protection and Control,2010,38(21):162-166,172.

[2] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.
CHEN Shuyong,SONG Shufang,LI Lanxin,et al. Survey on smart grid technology[J]. Power System Technology,2009,33(8):1-7.

[3] 田芳,李亚楼,周孝信,等. 电力系统全数字实时仿真装置[J]. 电网技术,2008,32(22):17-22.
TIAN Fang,LI Yalou,ZHOU Xiaoxin,et al. Advanced digital power system simulator [J]. Power System Technology,2008,32(22):17-22.

[4] 郑含博. 电力变压器状态评估及故障诊断方法研究[D]. 重庆:重庆大学,2012.
ZHENG Hanbo. Study on condition assessment and fault diagnosis approaches for power transformers[D]. Chongqing:Chongqing University,2012.

[5] 周求宽,万军彪,王丰华,等. 电力变压器振动在线监测系统的开发与应用[J]. 电力自动化设备,2014,34(3):162-166.
ZHOU Qiukuan,WAN Junbiao,WANG Fenghua,et al. Design and implementation of online vibration monitoring system for power transformer[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(3):162-166.

[6] 李莉,朱永利,宋亚奇. 变压器绕组多故障条件下的振动信号特征提取[J]. 电力自动化设备,2014,34(8):140-146.
LI Li,ZHU Yongli,SONG Yaqi. Feature extraction for vibration signal of transformer winding with multiple faults[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):140-146.

[7] TANG W H,SPURGEON K,WU Q H,et al. An evidential reasoning approach to transformer condition assessments[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(4):1696-1703.

[8] 廖瑞金,张德议,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.
- [9] 付强, 陈特放, 朱佼佼. 采用自组织 RBF 网络算法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1368-1375.
- FU Qiang, CHEN Tefang, ZHU Jiaojiao. Transformer fault diagnosis by using the self-organizing RBF network algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1368-1375.
- [10] 郭新辰, 宋琼, 秀玲. 基于半监督分类方法的变压器故障诊断[J]. 高电压技术, 2012, 38(5): 1096-1100.
- GUO Xinchen, SONG Qiong, XIU Ling. Transformer fault diagnosis based on semi supervised classification method[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(5): 1096-1100.
- [11] 白翠粉, 高文胜, 金雷, 等. 基于 3 层贝叶斯网络的变压器综合故障诊断[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 330-335.
- BAI Cuifen, GAO Wensheng, JIN Lei, et al. The integrated transformer fault diagnosis based on three layers Bayesian network[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 330-335.
- [12] 仲元昌, 万能飞, 夏艳, 等. 基于油气参数分析的电力变压器故障分步式诊断算法[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2279-2284.
- ZHONG Yuanchang, WAN Nengfei, XIA Yan, et al. Distributed diagnosis algorithm for transformer fault by dissolved gas-in-oil parameters analysis[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2279-2284.
- [13] 雷浩轺, 刘念, 崔东君, 等. 基于 GA 与 PSO 混合优化 FCM 聚类的变压器故障诊断[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(22): 52-56.
- LEI Haoxia, LIU Nian, CUI Dongjun, et al. FCM clustering of transformer fault diagnosis based on GA and PSO hybrid optimization[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(22): 52-56.
- [14] 符杨, 田振宁, 江玉蓉, 等. 加权模糊核聚类法在电力变压器故障诊断中的应用[J]. 高电压技术, 2010, 36(2): 371-374.
- FU Yang, TIAN Zhenning, JIANG Yurong, et al. Power transformer fault diagnosis using weighted fuzzy kernel clustering[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(2): 371-374.
- [15] 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.
- LIAO Yuxiang. Study on the comprehensive assessment model of transformer operation condition[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [16] 朱少敏, 刘建明, 刘冬梅. 基于模糊神经网络的电力企业数据中心绿色评价方法[J]. 电网技术, 2008, 32(19): 84-88, 97.
- ZHU Shaomin, LIU Jianming, LIU Dongmei. A fuzzy neural network based green evaluation method of power enterprise center[J]. Power System Technology, 2008, 32(19): 84-88, 97.
- [17] 高妍方. 判别贝叶斯网络的学习算法及其应用研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2008.
- GAO Yanfang. Research on learning methods and application of discriminative bayesian networks[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.

作者简介:



石少伟(1993—), 男, 河北张家口人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力设备故障判别和在线监控(E-mail: 1632986365@qq.com)。

Power transformer status evaluation and warning based on fuzzy comprehensive evaluation and Bayes discrimination

SHI Shaowei¹, WANG Ke¹, CHEN Li², YANG Fengge¹, LIU Pei¹, TAO Dan¹, LÜ Guofeng¹

(1. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: Since power transformer is one of the important equipments in smart distribution network, the accurate discrimination and warning of its operating status is of great significance. The status variables of power transformer are comprehensively analyzed and a corresponding evaluation index system is built, including four first-level indicators, i.e. oil chromatography, electrical test, insulation oil test and accessory operating condition, and eighteen second-level indicators. A power transformer status evaluation and warning model is established based on the fuzzy comprehensive evaluation and Bayes discrimination. Example proves that, the model can accurately and effectively evaluate the operating status of power transformer and make a corresponding warning and overhaul plan.

Key words: power transformers; status discrimination; fuzzy comprehensive evaluation; Bayes discrimination; models; warning