

基于局部放电信息融合的变压器 状态监测与评估

李劲松^{1,2}, 亓玉帅¹, 沈琦丰¹, 李国锋¹, 郑念峰², 王中庆²

1. 大连理工大学电气工程学院, 大连 116024

2. 鲁特电工股份有限公司研发与设计部, 济宁 272200

Condition Monitoring and Evaluation for Transformer Based on Partial Discharge Information Fusion

LI Jingsong^{1,2} QI Yushuai¹ SHEN Qifeng¹ LI Guofeng¹ ZHENG Nianfeng²
WANG Zhongqing²

1. School of Electrical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China

2. R & D, LUTE Electric Co., Ltd., Jining 272200, China

摘要: 目前, 针对变压器局部放电的研究通常采用单一局部放电检测方式对变压器进行状态监测与评估, 对于结构相对复杂的变压器, 此类检测技术及算法存在误检、漏检等情况, 造成变压器状态评估不合理、工程应用不佳等问题。因此, 本文提出了一种基于局部放电信息融合的变压器状态监测与评估策略, 针对同一放电源通过超声波、特高频、高频电流 3 种局部放电检测方式的信息融合对变压器运行状态进行评估。同时, 为了克服主观因素或者客观因素对评估结果的决定性影响, 本文采用主观赋权和客观赋权的组合赋权方式得到综合权重, 并运用可拓学中的物元分析法建立变压器状态评估模型和关联度矩阵确定变压器运行状态所隶属的评价等级, 实例计算表明, 基于局部放电信息融合的方法能够减少评估过程中不确定性和主观性等问题, 从而得到更为合理、客观的评估结果。

关键词: 变压器; 局部放电; 信息融合; 状态监测; 评估

ABSTRACT: At present, the research on partial discharge of transformer usually adopts a single partial discharge detection method to monitor and evaluate the condition of transformer. For the transformer with relatively complex structure, such detection technology and algorithm have false detection and missed detection, resulting in unreasonable transformer condition evaluation and poor engineering application. Therefore, a transformer condition monitoring and evaluation strategy based on partial discharge information fusion is proposed in this paper. For the same discharge power supply, the transformer operation state is evaluated through the information fusion of three partial discharge detection methods: ultrasonic, UHF and high-frequency current. At the same time, in order to overcome the decisive influence of subjective or objective factors on the evaluation results, this paper uses the combined weighting method of subjective weighting and objective weighting to obtain the comprehensive weight, and uses the matter-element analysis method in extension to establish the transformer state evaluation model and correlation matrix to determine the evaluation level of transformer operation state. The example calculation shows that the method based on partial discharge information fusion can reduce the uncertainty and subjectivity in the evaluation process, so as to obtain more reasonable and objective evaluation results.

KEY WORD: Transformer; Partial discharge; Information fusion; Condition monitoring; Evaluation

1 引言

当前我国已有较多变压器运行时间超过一定年限, 设备不可避免会出现绝缘老化等问题从而

引起故障隐患^[1-4], 所以对变压器运行状态进行评估不仅能够提前感知变压器运行状态变化, 避免部分故障的发生及恶化, 还能够减少由于变压器故障带来的经济损失。为此, 针对变压器的状态

监测研究一直是热点。如华北电力大学可再生能源重点实验室研制了一种基于光子晶体光纤的气体传感系统,该系统通过检测绝缘油中溶解 C_2H_2 的含量实现对变压器的在线监测^[5];加拿大研究人员提出了一种新的溶解气体分析方法,该方法结合了用于变压器故障诊断的关键气体和比率方法,即使对于严重的变压器故障该方法仍能够保持较高识别率^[6],解决了传统气体溶解分析方法对于变压器严重故障不敏感的问题;荷兰代尔夫特理工大学在局部放电中使用高频电流传感器推断出一种基于实测电压双时间积分的通用电荷估计方法^[7],推动了变压器局部放电在线监测的发展,如文献[8]使用特高频局部放电检测方式对变压器进行在线监测。但目前监测装置测量单一,比如超声波、高频或特高频等局放信号,而各种频率段局放信号有一定适用范围,其灵敏度不一,因此监测装置存在误报、漏报率高等问题。

此外,目前国内变压器状态监测与评估技术还没有形成统一的标准,造成变压器状态评估不合理、工程应用不佳等问题。如美国的电力科学研究院不仅对输变电设备运行状态进行评估,而且对相关评估系统进行了开发和研究^[9],减少了由于传统人工巡检方式带来的各种问题。日本的电力设备状态评估系统不仅仅局限于电力设备运行状态的评价^[10],还注重运用云计算对设备产生的海量数据进行处理,从而提高电力设备状态评估的准确度,增加评估结果的可信度。国内的输变电设备状态评估的研究起步较晚,最初针对电力设备的状态评估同样也是依据各种电力设备的状态评价导则进行研究^[11-13],传统的状态评估比较简单,就是依据设备运行数据的波动范围人为的给各项指标评价进行打分,最后得到设备的综合得分,状态等级的划分也比较简单,采用“非黑即白”的评价原则,即设备运行状态只有正常和异常两种状态。随着输变电设备状态评估技术的不断发展,传统的状态评估方法由于主观因素对评估结果起决定性影响、无法对电力设备的运行状态进行细分而逐渐被现在的评估方法所替代^[14]。近年来随着人工智能的迅速发展,各种机器学习算法应用到变压器状态评估中^[15],能够对变压器运行状态进行定量评估,但是评估指标局限于变压器油中溶解气体单一数据源,可能无法反映变压器整体运行状态。

由此可知,变压器是一个实际结构较为复杂的系统,其运行状态受到很多因素的影响,传统变压器状态评估往往仅依靠单一状态量构建评估模型,未能针对多源信息构建评估模型,单一状态量无法正确反映变压器的运行状态,导致评估结果不合理。为此,本文通过超声波、特高频、高频电流 3 种局部放电传感器感知设备采集变压器运行数据,并进行信息融合。然后利用组合赋权方式确定各评估指标的综合权重,并运用可拓学中的物元分析法建立变压器状态评估模型。之后,通过物元和关联函数的概念将变压器局部放电各项评估指标与运行等级评价区间的关系定量化,并通过综合权重和关联度矩阵确定变压器运行状态所隶属的评价等级。最后,通过实例计算表明,基于局部放电信息融合的方法能够减少评估过程中不确定性和主观性等问题,验证本文监测方法及评估模型的可行性。

2 系统总体架构设计

本文变压器在线监测系统是基于 STM32、FPGA 和树莓派设计完成的,FPGA 主要是对局部放电信号的采集;STM32 完成对信号融合处理;树莓派负责上位机人机界面显示。硬件部分设计包括信号的预处理、采集等部分;下位机软件设计包括采集局部放电信号的 FPGA 程序设计和信号处理的 STM32 程序设计,上位机为人机交互界面的软件设计,下位机各子模块之间采用 CAN 通信方式将数据传输到数据汇总模块,数据汇总模块通过串口通信与上位机人机界面进行数据交互,系统的总体设计框图如图 1 所示。

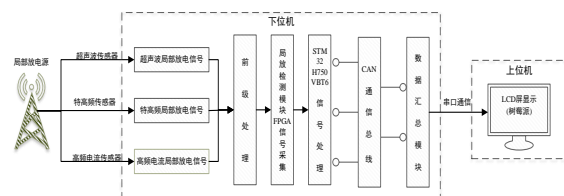


图 1 系统总体框图

Fig.1 Overall system block diagram

由图 1 可知,通过不同种类局部放电传感器检测放电源信号,信号经过滤波、放大等前级处理后再由 FPGA 芯片进行采样,采样完成后由 STM32 芯片对采样数据运算处理,然后由 CAN 通信数据总线将数据传输到汇总模块,最后采集

的局部放电信号数据通过串口通信在树莓派中实现可视化。

3 基于局部放电信息融合的变压器状态评估

根据图 1 所示系统总体框图, 本文首先基于局部放电信息融合的结构, 将 3 种局部放电检测方式检测的结果进行信息融合; 其次, 进行变压器状态评估的指标选取和状态等级划分; 之后, 为了克服主观因素或者客观因素对评估结果的决定性影响, 采用可拓学中的物元分析法构建变压器状态评估模型, 针对变压器局部放电将超声波、特高频、高频电流局部放电检测方式的结果进行信息融合对变压器的运行状态进行评估, 并给出相应的运维策略。

本文信息融合结构采用特征层信息融合, 主要是对不同局部放电检测方式检测结果的融合, 首先将不同传感器检测数据进行预处理, 然后通过赋予其不同权重构建变压器状态评估模型。假设将局部放电检测方式看作输入层, 评估模型看作中间层, 评估结果看作输出层, 如图 2 所示。

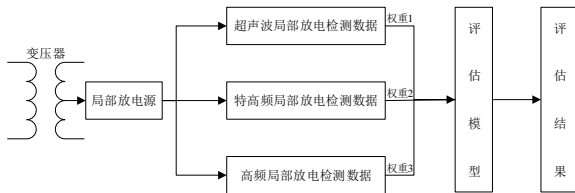


图 2 局部放电检测信息融合结构

Fig.2 Partial discharge detection information fusion structure

传统评估结构输入层仅考虑单一局部放电检测方式, 本文信息融合评估结构考虑超声波、特高频、高频电流 3 种局部放电检测方式, 通过评估模型将 3 个信息源的数据赋予不同权重并进行融合, 综合得出变压器的运行状态。

变压器状态评估系统包括指标权重确定与物元分析模型构建两部分, 如图 3 所示。为了避免权重确定过程中主观因素或客观因素对评估结果的决定性影响, 变压器评估指标采用主客观赋权融合的方式确定其权重, 选择可拓学中的物元分析法构建变压器状态评估模型。根据综合权重和关联度矩阵确定变压器评价矩阵, 再通过评价矩阵确定变压器运行所隶属的评级等级。

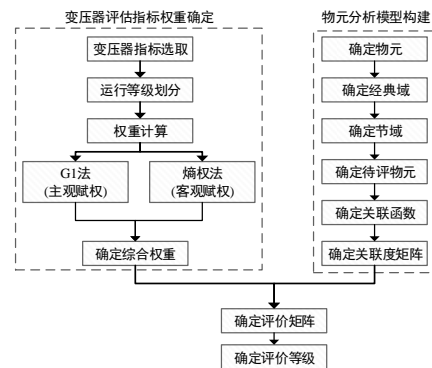


图 3 变压器状态评估系统结构图

Fig.3 Structure diagram of transformer condition evaluation system

4 变压器状态评估指标选取与等级划分

4.1 评估指标选取

变压器内部结构复杂, 其运行产生的海量数据包含其特征信息, 不同种类的数据从不同维度反映了变压器的运行状态, 选取全部指标量不仅工作量大而且也不现实, 指标选取既要保证评估指标的简洁性和普适性, 也应该不影响变压器运行状态。局部放电作为变压器的一种监测手段, 不仅能够实现变压器在线监测, 保证其正常运行, 还能够客观反映变压器运行状态。由于局部放电主要有超声波、特高频、高频电流 3 种检测方式, 所以为了克服单一检测方式不确定性等缺点, 从变压器局部放电 3 种检测方式选取评估指标进行多源信息融合并构建指标体系, 如图 4 所示。

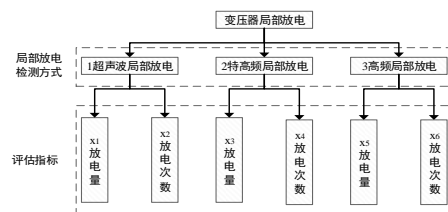


图 4 变压器状态评估指标体系

Fig.4 Transformer condition evaluation index system

由于局部放电能较为准确反映变压器运行状态, 本文变压器评估模型中指标选取以局部放电指标量为基础, 由于单一的 PD 检测方式存在误报、漏报等缺点, 所以选取较为常见的 3 种 PD 检测方式针对同一放电源进行检测, 避免偶然因素对检测结果的影响。主要选取的局部放电指标量是放电次数和放电电量, PD 放电量的大小和 PD 的放电次数对绝缘材料的影响程度很大, 如果 PD

放电量越大、在单位时间内的放电次数越多，则绝缘材料的绝缘损坏越严重，材料老化的速度越快，所以检测局部放电的放电量 and 放电次数是保证绝缘材料绝缘水平良好必须考虑的指标量，通过3种PD检测方式的特点确定各个评估指标量的权重大小完成对变压器的运行状态评估。

4.2 状态等级划分

对变压器运行状态等级划分是状态评估中的重要部分，在掌握变压器健康状态的同时还能够为后续运维策略提供参考。然而不同文献中等级划分有所差别^[16, 17]，划分的等级程度不同，没有统一标准。在变压器状态等级划分方面，传统的“是非制”已基本淘汰，即状态划分为两种状态，“合格”和“不合格”，这种划分方法虽然简单易于理解，但是不能更细致的评估变压器的运行状态，不利于后续的变压器运维管理。传统评估方法采用“评分制”，即以0~100分划分变压器的运行状态，但这种方法受人为因素较大，不能完全利用变压器的运行数据进行综合评判，不利于根据变压器的运行状态进行维修管理。

本文通过多次实验结果和实际情况对变压器运行状态进行等级划分。将传感器测得指标数据进行预处理，为了方便计算和不同评估指标量纲不同对实验结果的影响，对所有评估指标的量值进行了归一化处理。根据多次实验统计1min内局部放电指标数据的结果，将每个指标的范围划分为5个等级，根据指标数据确定变压器的运行状态等级，所以变压器的运行状态也划分为5个等级，如表1所示。

表1 变压器运行状态评价标准

Tab.1 Evaluation criteria for transformer operation

指标区间	status						运维策略
	评估指标 x_i						
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	
优秀	0.05	0.1	0.05	0.1	0.05	0.1	正常运行
良好	0.15	0.2	0.15	0.2	0.15	0.2	延期检修
一般	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	计划检修
故障	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	尽快检修
严重故障	1	1	1	1	1	1	立即检修

(1) 变压器处于“优秀”状态，意味着变压器的各项运行指标均在正常范围内波动，无异常

值出现，变压器完全处于正常状态，此时，变压器可以继续正常运行。

(2) 变压器处于“良好”状态，意味着变压器某项运行指标接近临界值或者在临界值附近波动，此时变压器处于正常状态，但是应延期检修。

(3) 变压器处于“一般”状态，意味着变压器的某些运行指标已超过正常值，但是此时异常指标值并未影响变压器运行，仍处于正常运行状态，但是应指定检修计划。

(4) 变压器处于“故障”状态，意味着变压器的某些运行指标已超过正常值，且异常的指标值已对变压器的运行造成了影响，此时，变压器可以带故障运行一段时间，但是只允许短时间运行，所以应尽快安排检修，防止出现更严重故障。

(5) 变压器处于“严重故障”状态，意味着某些指标数据劣化趋势非常明显，随时有可能出现危险事故，此时，变压器应该立即停电进行检修，降低事故发生率。

5 基于物元分析法的变压器状态评估模型及算法

5.1 多源信息的物元分析法模型构建

物元分析法是将待评价对象用“事物、特征、量值”3个元素来描述，将要评价事物记作N，其特征记为c，特征量值记为v，可以用有序三元组 $\mathbf{R}=(N,c,v)$ 作为描述待评对象的基本元，称为物元。其中，v由N和c确定，记作 $v=c(N)$ ，物元分为经典域物元、节域物元和待评价物元^[18]。一个事物有多个特征，如果事物N以n个特征 c_1, c_2, \dots, c_n 和相应的量值 v_1, v_2, \dots, v_n 描述，则表示为：

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} N & c_1 & v_1 \\ & c_2 & v_2 \\ & \dots & \dots \\ & c_n & v_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N & c_1 & c_1(N) \\ & c_2 & c_2(N) \\ & \dots & \dots \\ & c_n & c_n(N) \end{bmatrix} \quad (1)$$

本文从超声波(UT)、特高频(UHF)、高频电流(HFCT)局部放电检测3个方面对变压器进行状态评估，所以构建的物元模型如下：

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \text{局部放电(PD)} & c_1(\text{UT放电次数}) & v_1 \\ & c_2(\text{UT放电量}) & v_2 \\ & c_3(\text{UHF放电次数}) & v_3 \\ & c_4(\text{UHF放电量}) & v_4 \\ & c_5(\text{HFCT放电次数}) & v_5 \\ & c_6(\text{HFCT放电量}) & v_6 \end{bmatrix} \quad (2)$$

5.2 变压器评价关联函数和待评矩阵的确定

关联函数实质上是描述物元中元素到实轴上的映射关系,即论域中任意一点 v_i 与经典域 $v_{pij}=[a_{pij},b_{pij}]$ 和节域 $v_{qi}=[c_{qi},d_{qi}]$ 的量化关系。通过关联函数,可以定量描述物元特征,更能客观刻画待评对象不同评价等级的区别。

将点 v_i 到经典域和节域的距离定义为距,则论域中任意一点 v_i 到 $v_{pij}=[a_{pij},b_{pij}]$ 和 $v_{qi}=[c_{qi},d_{qi}]$ 的距分别为:

$$\rho(v_i, v_{pij}) = \left| v_i - \frac{a_{pij} + b_{pij}}{2} \right| - \frac{b_{pij} - a_{pij}}{2} \quad (3)$$

$$\rho(v_i, v_{qi}) = \left| v_i - \frac{c_{qi} + d_{qi}}{2} \right| - \frac{d_{qi} - c_{qi}}{2} \quad (4)$$

式中: $\rho(v_i, v_{pij})$ 为点 v_i 到经典域的距; $\rho(v_i, v_{qi})$ 为点 v_i 到节域的距。

$v_{pij}=[a_{pij},b_{pij}]$ 的模定义为:

$$|v_{pij}| = |b_{pij} - a_{pij}| \quad (5)$$

则变压器运行状态评价对象 N 第 i 个评价指标关于第 j 个评价等级的关联函数可以表示为:

$$k_j(v_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(v_i, v_{pij})}{|v_{pij}|} & v_i \in v_{pij} \\ \frac{\rho(v_i, v_{pij})}{\rho(v_i, v_{qi}) - \rho(v_i, v_{pij})} & v_i \notin v_{pij} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $k_j(v_i)$ ——表示待评物元在第 j 个评价等级下第 i 个评价指标的关联度

由此可得变压器运行状态 m 个评价指标在 n 个评价等级下的综合关联度矩阵为:

$$\mathbf{K} = |\mathbf{K}_1 \mathbf{K}_2 \cdots \mathbf{K}_j \cdots \mathbf{K}_m| \quad (7)$$

得到变压器运行状态权重矩阵和综合关联度矩阵后,即可得到变压器运行状态的评价矩阵为:

$$\mathbf{H} = \omega \cdot \mathbf{K} \quad (8)$$

式中 ω 为变压器运行状态的权重矩阵,其中

$$\omega = |\omega_{gs1} \omega_{gs2} \cdots \omega_{gsi} \cdots \omega_{gsm}| \quad (9)$$

式(9)中 ω_{gsi} 是第 i 个变量的主客观综合权重,可参考主客观权重法及相关文献来确定^[11]如下:

$$\omega_{gsi} = \frac{\omega_{gi} \omega_{si}}{\sum_{i=1}^m \omega_{gi} \omega_{si}} \quad (10)$$

式(10)中 ω_{gi} 第 i 个变量的主客观权重, ω_{si} 第 i 个变量的客观权重。

因此,根据表 1 及式(1)~(10)可知,在评价矩阵 \mathbf{H} 中,若第 j 列的值最大,则变压器运行状态隶属于第 j 个评价等级。

6 实验测试

本文在实验室搭建的局部放电检测实物如图 5 所示。测试的主要内容是针对同一局放源,用特高频、高频、超声波局部放电检测方式对其进行检测,通过实验对比,证明针对局部放电信息融合的检测方式较单一检测方式的状态评估结果更可靠。

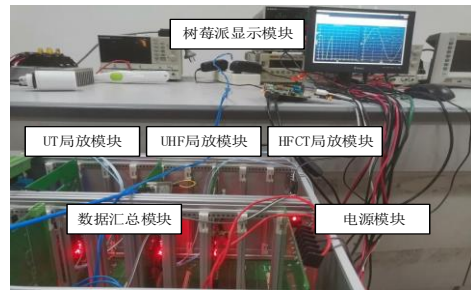


图 5 局部放电检测实验平台

Fig.5 Partial discharge detection experimental platform

在保证系统通信正常的情况下进行局部放电模拟实验,考虑到实验室现有条件和限制,通过模拟局部放电代替变压器实际放电的发生。为了验证基于多源信息融合的局部放电状态评估效果更好,分别选取模拟变压器持续放电时间 2 s、5 s、10 s 时的实验结果进行分析。模拟放电时,针对同一放电源,通过 3 种局部放电检测方式进行检测,以特高频局部放电检测方式为例进行说明,对于 3 组模拟放电实验特高频检测方式的结果如图 6、7 和 8 所示。

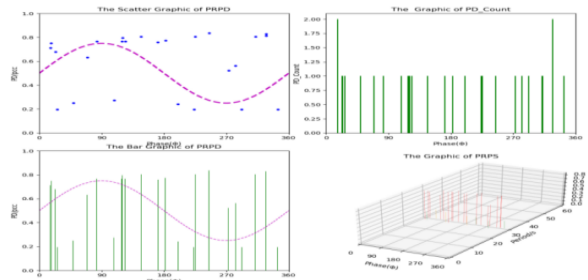


图 6 模拟局部放电 2 s 时检测结果

Fig.6 Test results at 2 s of simulated partial discharge

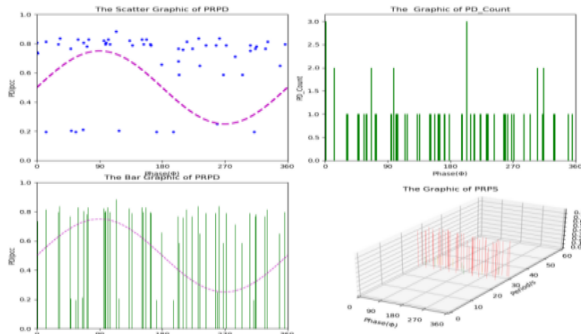


图 7 模拟局部放电 5 s 时检测结果

Fig.7 Test results at 5 s of simulated partial discharge

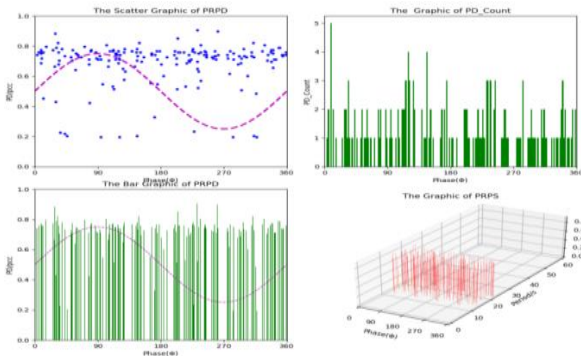


图 8 模拟局部放电 10 s 时检测结果

Fig.8 Test results at 10 s of simulated partial discharge

模拟实验完成后, 根据平台检测数据进行状态评估, 首先计算出评价指标的综合权重, 再根据实验平台测得数据和各项评价指标不同等级区间对变压器运行状态作出评价结果。将不同实验结果指标量进行归一化处理的结果如表 2 所示。

表 2 不同局部放电时间的各评估指标

Tab.2 Evaluation indexes of different partial discharge time

放电时间 (s)	评估指标 x_i					
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
2	0.04	0.41	0.05	0.66	0.05	0.54
5	0.08	0.39	0.12	0.69	0.10	0.54
10	0.28	0.49	0.36	0.73	0.31	0.62

由于变压器运行状态的每个待评价指标被划分为 5 个不同评价等级, 即 5 种不同运行状态, 然后再根据表 2 中实验数据和主客观熵权法计算各指标的熵权值, 变压器运行状态各评估指标权重分布如表 3 所示。

表 3 变压器运行状态各评估指标权重

Tab.3 Weights of various evaluation indexes for transformer operation status

权重	评估指标 x_i					
	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
ω_{gi}	0.11	0.12	0.21	0.23	0.16	0.17
ω_{si}	0.18	0.14	0.18	0.13	0.19	0.18
ω_{gsi}	0.12	0.10	0.23	0.18	0.18	0.19

根据式(2)可知变压器运行状态关于 5 个评价等级的总体经典域物元可以表示为:

$$R_p = \begin{bmatrix} N_p & \text{优秀} & \text{良好} & \text{一般} & \text{故障} & \text{严重故障} \\ c_1 & [0,0.05] & [0.05,0.15] & [0.15,0.3] & [0.3,0.5] & [0.5,1] \\ c_2 & [0,0.1] & [0.1,0.3] & [0.3,0.5] & [0.5,0.7] & [0.7,1] \\ c_3 & [0,0.05] & [0.05,0.15] & [0.15,0.3] & [0.3,0.5] & [0.5,1] \\ c_4 & [0,0.1] & [0.1,0.3] & [0.3,0.5] & [0.5,0.7] & [0.7,1] \\ c_5 & [0,0.05] & [0.05,0.15] & [0.15,0.3] & [0.3,0.5] & [0.5,1] \\ c_6 & [0,0.1] & [0.1,0.3] & [0.3,0.5] & [0.5,0.7] & [0.7,1] \end{bmatrix}$$

下面以模拟放电时间 10 s 为例, 根据实验结果和式(1)构建变压器运行状态的待评物元为:

$$R_{(10s)} = \begin{bmatrix} N & c_1 & 0.276 \\ & c_2 & 0.486 \\ & c_3 & 0.362 \\ & c_4 & 0.732 \\ & c_5 & 0.312 \\ & c_6 & 0.618 \end{bmatrix}$$

根据式(2) ~ (7)可以计算模拟局放 10 s 时变压器运行状态的关联度矩阵为:

$$K_{(10s)} = \begin{bmatrix} -0.45 & -0.32 & 0.13 & -0.07 & -0.44 \\ -0.44 & -0.37 & -0.28 & 0.05 & -0.02 \\ -0.46 & -0.37 & -0.14 & 0.30 & -0.28 \\ -0.70 & -0.66 & -0.61 & -0.46 & 0.46 \\ -0.46 & -0.34 & -0.03 & 0.05 & -0.38 \\ -0.58 & -0.53 & -0.46 & -0.24 & 0.24 \end{bmatrix}$$

再根据式(8)可以计算出模拟局放 10 s 时变压器运行状态的评价矩阵为:

$$H_{(10s)} = \omega \cdot K_{(10s)} = [-0.52 \ -0.44 \ -0.25 \ -0.05 \ -0.06]$$

同理可以计算不同模拟局部放电时间时变压器运行状态的总体评价矩阵为:

$$H = \begin{bmatrix} H_{(2s)} & -0.22 & -0.24 & -0.54 & -0.47 & -0.42 \\ H_{(5s)} & -0.43 & -0.03 & -0.35 & -0.38 & -0.36 \\ H_{(10s)} & -0.52 & -0.44 & -0.25 & -0.05 & -0.06 \end{bmatrix}$$

由总体评价矩阵可以看出, 模拟局部放电时间 2 s、5 s、10 s 时评价矩阵的第 1、2、4 列值最大, 所以隶属的评价等级分别为“优秀”、“良好”、“故障”。由于变压器实际运行环境的外界因素干扰, 可能会对检测结果造成影响, 可以看出 3 组实验的评估结果比较符合实际情况。

其中对于模拟局部放电 10 s 时系统状态评估的结果如图 9 所示, 此时变压器的运行状态为故障, 应尽快检修, 防止变压器故障进一步恶化。

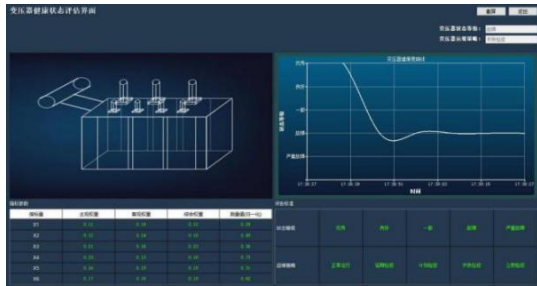


图 9 模拟局部放电 10 s 时变压器状态评估界面
Fig.9 Transformer status evaluation interface when
simulating partial discharge for 10 s

7 结论

(1) 针对同一放电源只用一种检测方式获取信息源, 可能会存在误检、漏检、应用场合适应度不够高等问题, 从而造成变压器运行状态评估结果准确度下降的问题, 本文通过特征层数据融合结构将超声波、特高频、高频电流局部放电等不同种类传感器采集数据进行信息融合, 为变压器状态监测提供更为合理、客观的评估结果。

(2) 为了克服主观因素或者客观因素对评估结果的决定性影响, 指标权重确定采用主观赋权和客观赋权的组合赋权方式, 采用可拓学中的物元分析法构建变压器状态评估模型, 从而得到更为合理、客观的评估结果。

致 谢

本文获得中国博士后科学基金面上项目(2022M711318), 山东省科技型中小企业创新能力提升工程项目(2021TSGC1408), 教育部产学研合作协同育人项目(202102449010, 202102531001, 202101109001), 济宁市重点研发计划(2020PZJY006), 中央高校基本科研业务费(DUT20RC(3)018)和国家自然科学基金青年科学

基金(51807106)资助。

参 考 文 献

- [1] 王保义, 杨韵洁, 张少敏. 改进 BP 神经网络的 SVM 变压器故障诊断[J]. 电测与仪表, 2019, 56(19): 53-58.
Wang Baoyi, Yang Yunjie, Zhang Shaomin. Improved BP neural network SVM transformer fault diagnosis[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(19): 53-58.
- [2] 李玲玲, 刘敬杰, 凌跃胜, 等. 物元理论和证据理论相结合的电能质量综合评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 383-391.
Lilingling, liujingjie, Ling Yuesheng, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on matter-element theory and evidence theory [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 383-391.
- [3] K. X. Hong, M. Jin, H. Huang. Transformer winding fault diagnosis using vibration image and deep learning[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2021, 36(2): 676-685.
- [4] J. Tang, J. Zhou, X. Zhang, et al. A transformer partial discharge measurement system based on fluorescent fiber[J]. Energies, 2012, 5(5): 1490-1502.
- [5] Y. Wang, G. M. Ma, D. Y. Zheng, et al. Detection of dissolved acetylene in power transformer oil based on photonic crystal fiber[J]. IEEE Sensors Journal, 2020, 42(99): 1-6.
- [6] A. Nanfak. Interpreting dissolved gases in transformer oil: A new method based on the analysis of labelled fault data[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2021, 2021(2): 1-16.
- [7] A. Rodrigo-Mor, F. A. Muoz, L. C. Castro-Heredia. Principles of charge estimation methods using high-frequency current transformer sensors in partial discharge measurements[J]. Sensors, 2020, 20(9): 2520-2526.
- [8] 蔡鋈, 袁文泽, 张轩瑞, 等. 基于特高频自感知的变压器局部放电检测方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(06): 2041-2050.
Cai Gui, Yuan Wenzhe, Zhang Xxuanrui, et al. Partial discharge detection method of transformer based on UHF self-sensing[J]. High Voltage Technology, 2021, 47(06): 2041-2050.
- [9] 王硕. 基于大数据分析技术的输变电设备状态评估系统的设计与实现[D]. 济南: 山东大学, 2018.
Wang Shuo. Design and implementation of power transmission and transformation equipment condition evaluation system based on big data analysis technology[D]. Jinan: Shandong University, 2018.
- [10] 张博文, 阎春雨, 毕建刚, 等. 基于大数据的输变电设备状态

- 预警系统架构研究[J]. 电力信息与通信技术, 2016, 14(12): 26-32.
- Zhang Bowen, Yan Chunyu, Bi Jiangang, et al. State early warning of power transmission and transformation equipment based on big data research on system architecture[J]. Power Information and Communication Technology, 2016, 14(12): 26-32.
- [11] 35kV~500kV 油浸式电力变压器(高抗)状态评价导则: Q/CSG11001-2014[S]. 广州: 中国南方电网公司, 2014.
- [12] 廖瑞金, 王有元, 刘航, 等. 输变电设备状态评估方法的研究现状[J]. 高压技术, 2018, 44(11): 3454-3464.
- Liao Ruijin, Wang Youyuan, Liu Hang, et al. Research status of condition assessment methods for power transmission and transformation equipment[J]. High voltage technology, 2018, 44(11): 3454-3464.
- [13] 王海亮, 邓玲. 直觉模糊层次分析法下变压器状态的灰色模糊综合评判模型[J]. 高压电器, 2020, 56(09): 216-222.
- Wang Hailiang, Deng Ling. Grey fuzzy comprehensive evaluation model of transformer state based on intuitionistic fuzzy analytic hierarchy process[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(09): 216-222.
- [14] Okabe, Shigemitsu, Ueta, et al. Partial discharge induced degradation characteristics of insulating structure constituting oil-immersed power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5): 179-191.
- [15] P. Lorin, P. Khanna, P. Werle, et al. Transformer condition assessment: methodologies and on-site repair solutions[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2014, 20(5): 50-57.
- [16] M. Dong, A. B. Nassif, B. Z. Li. A data-driven residential transformer overloading risk assessment method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 387-396.
- [17] Z. Wang, Y. Ran, Y. Chen, et al. Failure mode and effects analysis using extended matter-element model and AHP[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 140: 106233.
- [18] G. Qiu, Z. Xie, H. Sheng, et al. Transformer fault diagnosing method based on euthenics and rough set theory[J]. International Journal of Security and its Applications, 2014, 8(5): 65-74.
- [19] Okabe, Shigemitsu, Ueta, et al. Partial discharge induced degradation characteristics of insulating structure constituting oil-immersed power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5): 179-191.
- [20] P. Lorin, P. Khanna, P. Werle, et al. Transformer condition assessment: methodologies and on-site repair solutions[J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2014, 20(5): 50-57.
- [21] M. Dong, A. B. Nassif, B. Z. Li. A data-driven residential transformer overloading risk assessment method[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 387-396.
- [22] Z. Wang, Y. Ran, Y. Chen, et al. Failure mode and effects analysis using extended matter-element model and AHP[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 140: 106233.
- [23] G. Qiu, Z. Xie, H. Sheng, et al. Transformer fault diagnosing method based on euthenics and rough set theory[J]. International Journal of Security and its Applications, 2014, 8(5): 65-74.

作者简介:

李劲松 男, 1987 年生, 河南商丘, 工学博士, 副教授/硕士研究生导师, 主要从事储能型功率跟踪电力变压器、减振降噪及非接触智能检测等领域研究工作。

E-mail: lijingsong2019@dlut.edu.cn

亓玉帅 男, 1998 年生, 山东莱芜, 硕士研究生, 电气工程专业, 研究方向为面向储能应用的功率跟踪型电力变压器关键技术研究。

E-mail: qiyushuai@mail.dlut.edu.cn