

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.230261

基于多源融合的油纸绝缘套管缺陷辨识及绝缘状态评估

郑含博¹, 敬佳兴¹, 罗晓庆², 刘泰蔚², 李一航¹

(1. 广西电力系统最优化与节能技术重点实验室(广西大学), 广西 南宁 530004; 2. 中国电力科学研究院有限公司电网环境保护国家重点实验室, 湖北 武汉 430074)

摘要: 油浸纸绝缘套管作为变压器的关键组件, 其绝缘受损会威胁变压器主设备的运行安全。针对此现状, 提出一种基于多源融合的油纸绝缘套管缺陷辨识及绝缘状态评估方法。首先, 根据实际运行工况制备典型缺陷试验套管, 并开展频域介电响应、局部放电及红外热成像联合试验, 辨识套管缺陷种类。然后, 提取套管绝缘指标量, 引入隶属度函数及状态得分算子, 建立基于博弈论组合赋权法的套管绝缘状态评估模型。最后, 分别采用组合赋权法和单一赋权法的评估模型, 对正常以及缺陷套管进行算例分析。结果表明: 联合试验可以准确辨识套管缺陷种类。组合赋权法弥补了单一赋权法评估结果片面的不足, 且正常套管的模型评估分数均高于缺陷套管。评估结果与套管实际绝缘状态一致, 验证了套管绝缘状态评估模型的正确性及有效性。

关键词: 油浸纸绝缘套管; 典型缺陷模拟; 频域介电特性; 局部放电; 状态评估

Defect identification and insulation condition assessment of an oil-immersed paper insulation bushing based on multi-source fusion

ZHENG Hanbo¹, JING Jiaying¹, LUO Xiaoqing², LIU Taiwei², LI Yihang¹

(1. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Saving Technology (Guangxi University), Nanning 530004, China; 2. State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection, China Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

Abstract: As a key component of transformers, oil-immersed paper insulation bushing can pose a threat to the operational safety of the transformer's main equipment if their insulation is damaged. The paper proposes a method for defect identification and insulation condition assessment of an oil-immersed paper insulation bushing based on multi-source fusion. First, typical defect test bushings are made. Then the types of bushing defects are identified by frequency domain dielectric response, partial discharge, and infrared thermal imaging related joint testing. Then the insulation index of the bushing is extracted and the membership function and state score operator are introduced. The evaluation model of bushing insulation state based on game theory combined weighting method is established. Finally, evaluation models using the combination and single weighting methods are used for example analysis of normal and defective bushings. The results show that joint testing can accurately identify the types of casing defects. The method avoids the problem of one-sided evaluation results using a single weighting method. The evaluation scores of normal bushings are higher than those of defective bushings. The correctness and effectiveness of the bushing insulation state evaluation model are verified.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277139 and No. 52367014).

Key words: oil-immersed paper insulation bushing; simulation of typical defect; frequency dielectric properties; partial discharge; condition assessment

0 引言

高压套管作为一种起到电能输送与绝缘作用的

电力设备, 是确保电力变压器安全运行的重要辅助设施之一^[1-5]。高压套管的工作环境往往会存在高电压和大电流, 同时还受到拉力、振动、发热等各个方面的影响^[6]。在这样的工作环境下, 套管极易出现不可预知的故障, 从而影响套管的寿命, 更会危及电力变压器的安全稳定运行^[7]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277139, 52367014); 广西科技基地和人才专项科技项目资助(2020AC19010)

此外，油浸纸绝缘套管目前是装配在变压器上最广泛的套管，出现缺陷也较多。通过 CIGRE 工作组 A2.37 在 2017 年的统计报告可知，由套管引起的故障数量为变压器故障总数的 28%^[8]。而套管故障往往是由于套管出现绝缘缺陷所引发的。对油浸纸绝缘套管绝缘缺陷进行统计与归类，常见的缺陷有油位不足缺陷、极板绝缘缺陷、套管芯体受潮缺陷和末屏接地不良缺陷等。这些绝缘缺陷会导致套管本体产生局部放电以及表面温升过大的问题，导致其介质损耗和电容量普遍高于正常套管，严重影响了套管的正常稳定运行^[9-10]。

近年来，频域介电特性、局部放电测试等方法被越来越多的学者应用于套管绝缘状态检测上。国内外学者对套管芯体受潮缺陷进行频域介电特性研究，研究表明套管的介质损耗对水分较为敏感，受潮后的介质损耗会显著增大^[11-13]。检测套管绝缘状态还可以观察其局部放电过程，特高频局部放电检测技术具有抗干扰能力强、检测灵敏度高的优点^[14-15]。超声波局部放电检测也能有效反映绝缘状态，但易受环境干扰^[16]。文献[17]提出了脉冲电流分布测量法，很好地解决了低局部放电量检测困难的难题，提高了检测的灵敏度。然而，上述研究多使用单一方法对套管进行测量，普适性较差，并且针对套管缺陷种类的研究较少。目前，在辨识套管绝缘缺陷方面，迫切需要融合多种技术、多维度多方面分析的辨识方法。本文联合多源测量技术，有效地获得套管绝缘参量并辨识套管绝缘缺陷。

通过多种测量技术，可以辨识套管不同缺陷，得到套管相关指标量。但上述参量对套管绝缘状态的判断具有局限性，需要建立套管绝缘状态评估模型进行全面评估。

然而，单一的评估赋权法会陷入局部主观，造成评估结果不合理的情况，无法进行有效评估^[18-19]。博弈论组合赋权兼顾了主客观赋权的博弈平衡，不偏颇某一赋权法，并最终能够给出合理的评估^[20-21]。因此本文基于博弈论组合赋权法，建立了套管绝缘状态评估模型。

本文基于油浸纸绝缘套管实际运行工况，模拟了 4 种典型缺陷(油位不足缺陷、极板绝缘缺陷、套管芯体受潮缺陷和末屏接地不良缺陷)，并对其进行频域介电响应测试以及多种类的局部放电测试。分析了不同缺陷频域响应特性以及局部放电特征参量，多维度识别油浸纸绝缘套管不同缺陷特征差异。对试验所得指标量建立了基于博弈论组合赋权法的缺陷套管状态评估模型，降低了单一赋权法对评估结果的随机性，从而验证了套管绝缘多源测量技术

与评估模型的有效性，实现了不同缺陷下套管绝缘状态的检测与评估。

1 实验部分

1.1 典型故障套管缺陷设计与模拟

本文选取额定电压 U_m 为 72.5 kV、额定电流 I_r 为 630 A 的油浸纸绝缘套管来模拟故障套管，且 4 支套管电气绝缘性能完全一致，从而达到控制试验变量和提高准确性的试验要求。如图 1 所示，在 4 支相同的油浸纸绝缘套管中，设置了 4 种常见工况故障。



图 1 油浸纸绝缘套管实物图

Fig. 1 Oil-immersed paper insulation bushing physical diagram

本文在最外层极板边缘附着一根直径为 0.1 mm 的细铜丝，模拟极板绝缘缺陷，如图 2 所示。为简化篇幅，将其余 3 种缺陷聚集显示，如图 3 所示。本文使用芯体水分含量为 5% 的套管作为试验样品，在套管的取油口注入水分，并于恒温恒湿条

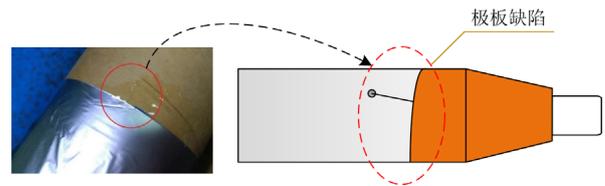


图 2 极板绝缘缺陷

Fig. 2 Plate insulation defects

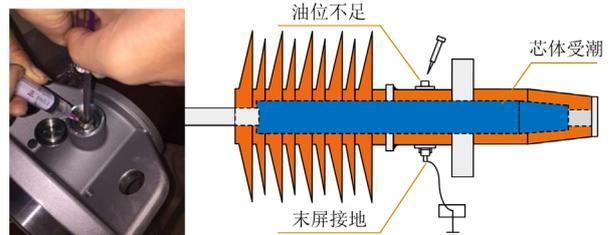


图 3 油位不足、芯体受潮及末屏接地不良缺陷
Fig. 3 Insufficient oil level, core dampened and poor grounding of bushing tap defects

件下加热使水分充分扩散在芯体内部, 从而模拟芯体受潮缺陷。此外, 通过打开套管中间法兰处取样口的端盖, 使套管内部绝缘油流出并干燥处理, 从而模拟油位不足缺陷。进一步, 本文在加压前卸去套管末屏接地端盖, 露出末屏引杆, 再利用接地杆挂住末屏引杆的方法使套管末屏接地, 从而模拟末屏接地不良缺陷。

1.2 套管频域介电响应、局部放电及红外测试

本次试验采用瑞典 Megger 公司生产的 IDAX300 及其配套的 VAX200 电压放大器(最大输出电压 2 kV)组成的测试系统测量套管主绝缘频率响应特性, 频域介电响应试验接线如图 4 所示。对套管施加的激励电压为 1 kV, 测量不同缺陷情况下, 套管的复电容以及介质损耗角。由于温度对于频域介电曲线的影响程度较大, 因此控制试验场所温度恒定为 26 °C, 湿度控制为 50%, 与型式试验保持一致, 减少实验中的干扰因素。本文使用超声波局部放电传感器、特高频局部放电传感器以及高频电流传感器检测套管局部放电过程, 并对不同局部放电传感器获得的结果对比分析。此外, 对套管发射红外辐射进行探测, 从而获得温度分布显示结果。

1.3 多源融合检测套管绝缘状态的试验方法

本文使用了频域介电谱、超声波局部放电、特高频局部放电、高频电流局部放电及红外成像等方法对多源融合检测套管的绝缘状态进行测量。

开展频域介电谱测试, 测试激励电压设为 1 kV, 测试频率范围为 0.002~1000 Hz, 测试时间为 20 min。进行局部放电测试, 施加额定电压及电流, 得到

有带阻滤波的放电脉冲序列(phase resolved pulse sequence, PRPS)图谱, 并使用高频电流传感器检测得到一个工频周期内的局部放电时域图谱。然后, 对测试结果进行了对比分析, 获得套管绝缘状态相关特征参量。此外, 多源局部放电试验接线图如图 5 所示。使用高频电流传感器检测并得到一个工频周期内的局部放电时域图谱。最后, 对套管进行红外热成像实验, 并将各个实验测试结果进行对比分析, 获得套管绝缘状态相关特征参量。

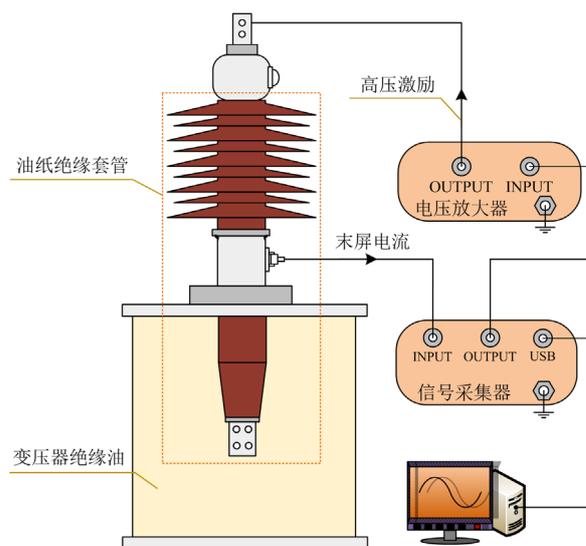


图 4 频域介电响应试验接线图

Fig. 4 Wiring diagram of frequency domain dielectric response test of bushing

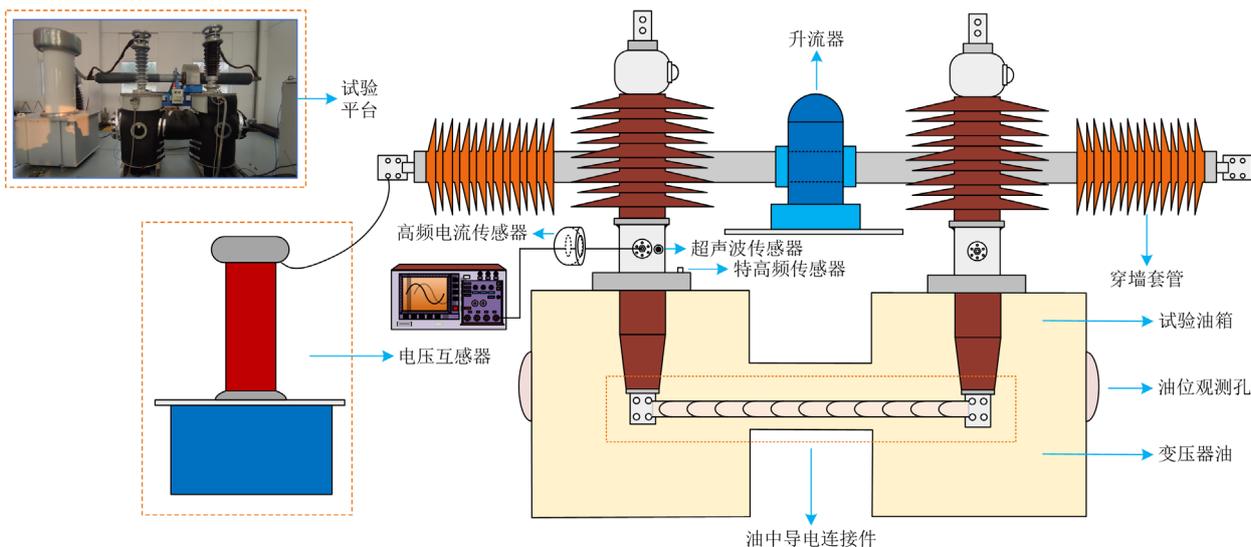


图 5 多源局部放电试验接线图

Fig. 5 Wiring diagram of multi-source partial discharge test

2 测量结果及缺陷辨识分析

2.1 不同缺陷下油纸绝缘套管的频域介电响应特性及分析

图 6 显示了在 1 kV 激励电压下,不同缺陷套管的频域介电特性曲线。由图 6(a)可知,随着激励电压频率的升高,4 种不同缺陷套管介质损耗均有明显下降的趋势。而芯体受潮缺陷油浸纸套管的介质损耗则远高于其他 3 种缺陷,这是由于套管密封性能下降,使油浸纸芯子内部水分不断增加,离子含量也逐渐上升,从而导致其频域介电谱曲线低频部分的电导损耗增加。而该曲线中频部分受偶极子松弛极化损耗影响,受潮的芯体中水分子较多,增大了该损耗,使曲线中部呈现凹陷趋势。此外,油纸之间的交界处以及油纸不均匀受潮引起的空间电荷变化会产生界面极化损耗,该损耗影响着频域介电谱曲线高频部分,并且会出现“弛豫峰”。因此,水分会影响整个频带的频域介电谱曲线,使得受潮缺陷介质损耗相较于其他缺陷会显著增大。

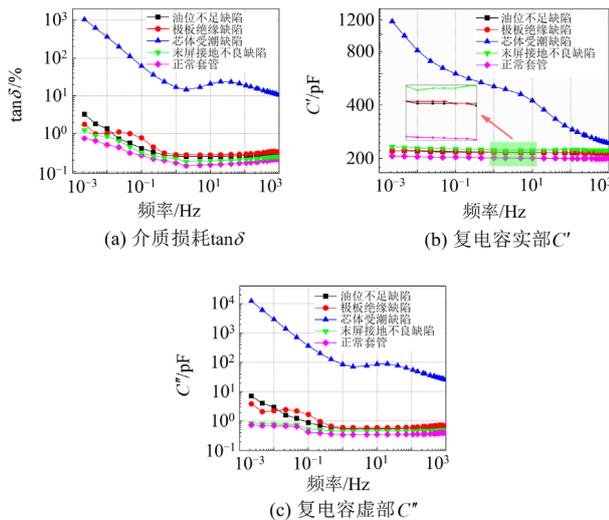


图 6 不同缺陷套管的频域介电特性曲线

Fig. 6 Frequency domain dielectric characteristic curves of different defect bushings

图 6(b)显示了 4 种不同缺陷在 1 kV 激励电压下的复电容实部。极板绝缘缺陷套管由于在极板边缘附着了细铜丝,铜丝尖角处局部场强增大,改变了套管内部电容结构,因此其电容量在低频处不断增大。但由于套管内部结构是由多电容串联而成,单层极板电容不会对整体电容值造成骤升的影响,因此电容量变化不大。复电容的虚部主要表征的是介质损耗,因此图 6(c)中的曲线与图 6(a)中的曲线变化趋势基本一致。

以上述为基础,套管芯子受潮缺陷套管的介电特性曲线相较于其他 3 种缺陷有明显的上升形态。具体而言,受潮缺陷的介质损耗在低频部分上升较快,且复电容实部增加了约 10^2 的数量级。

2.2 不同缺陷下油纸绝缘套管局部放电特性

2.2.1 超声波局部放电检测结果及分析

本次试验采用英国 SDMT 公司生产的 PD74 接触式超声传感器作为局部放电传感器,检测套管局部放电情况,通过布置该类型传感器在升高座上部的的方式提取套管的 PRPS 图谱。将电压增至起始放电电压 72.5 kV 时,得到的 PRPS 图谱如图 7 所示。从图 7 中可以得知,芯体受潮缺陷套管 PRPS 图谱最大幅值达到了 93.3 mV,且信号分布具有较好的聚类性,主要聚集在 0° 、 180° 以及 360° 相位附近。

综上所述,芯体受潮缺陷套管 PRPS 图谱放电峰值最大,分布具有规律性,相较于其他缺陷 PRPS 图谱有明显的特征。

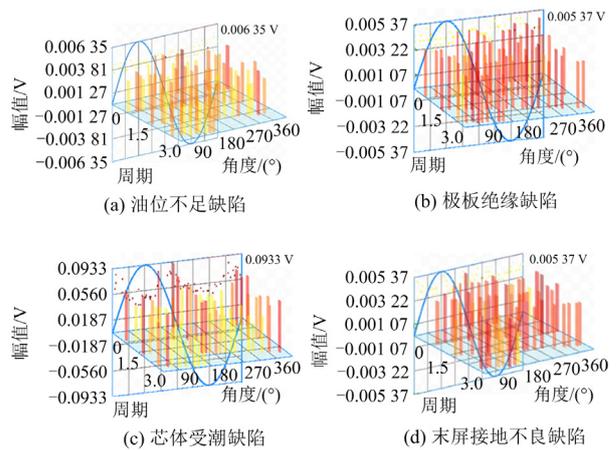


图 7 不同缺陷套管超声波局部放电系统 PRPS 图谱

Fig. 7 PRPS spectra of ultrasonic partial discharge system for bushings with different defects

2.2.2 特高频局部放电检测结果及分析

为了横向对比检测结果,本文采用特高频局部放电检测系统进行试验。施加电压为 72.5 kV、电流为 630 A 时,利用该设备进行测量,得到有带阻滤波的 PRPS 图谱,如图 8 所示。如图 8(a)所示,在电压与电流的共同作用下,特高频局部放电检测系统耦合了较多的脉冲序列。油位不足缺陷套管放电脉冲主要分布在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 和 $270^\circ \sim 360^\circ$ 相位之间,特征较为明显。图 8(a)中 PRPS 图谱脉冲幅值有较大的增加,而其余缺陷局部放电信号(图 8(b)~图 8(d))分布于整个周期,分布情况较为发散。此外,由图 8(c)可得,芯体受潮缺陷套管产生的局部放电信号多聚集于 90° 相位,而其他相位分布较少。由上

述试验结果可知, 油位不足缺陷套管局部放电信号具有较强聚集性的特点。

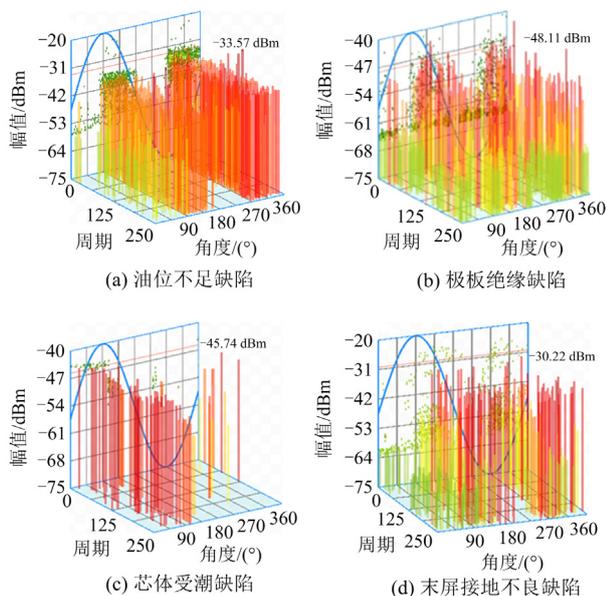


图 8 不同缺陷套管特高频局部放电系统 PRPS 图谱

Fig. 8 PRPS spectra of ultra high frequency partial discharge system for bushings with different defects

2.2.3 高频电流传感器局部放电检测结果及分析

本文使用高频电流传感器监测在外施 72.5 kV 电压下的局部放电脉冲。将套管的电压信号过零点作为示波器局部放电采集的触发信号, 使得相位同步, 从而得到一个周期内两个通道的时域波形。由于局部放电信号幅值通常在几十毫伏, 相关局部放电脉冲信息会被淹没, 因此本文设置与脉冲信号幅值匹配的正弦信号进行局部放电分析。

分析局部放电脉冲信号图谱, 对 4 种套管典型缺陷的特征进行阐述。

1) 由图 9(a)可知: 套管油位不足缺陷产生的局部放电幅值较小, 工频信号的正半周期和负半周期均出现了局部放电信号, 但是局部放电脉冲信号数量较少。在工频周期内局部放电信号幅值最大为 50 mV。

2) 由图 9(b)可知: 当外施电压施加到套管起始放电电压时, 局部放电脉冲幅值增加。极板尖端处由于空间电荷改变, 会产生更大的反向压降, 加剧局部放电程度。且每次放电产生的反向电荷也不相等, 从而导致了局部放电脉冲幅值变大。在工频周期内局部放电信号最大幅值大于 200 mV。

3) 由图 9(c)可知: 绝缘受潮缺陷局部放电脉冲主要分布在一、三象限, 且出现频率较高, 相对套管其他缺陷具有明显的聚集性。

4) 由图 9(d)可知: 末屏接地不良缺陷局部放电次数相对较少, 与油位不足缺陷放电情况类似, 但最大放电幅值只有 15 mV, 比前者降低了 66%, 放电特征明显。

通过对比不同缺陷套管的局部放电脉冲图谱, 可知由于极板绝缘缺陷所引发的局部放电信号峰值远大于其他缺陷, 且主要分布于一、三象限。

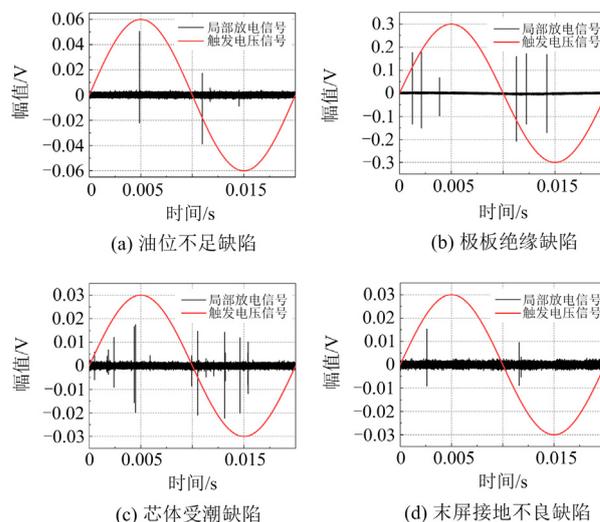


图 9 不同缺陷套管的高频局部放电脉冲图谱

Fig. 9 High frequency partial discharge pulse spectra of different defect bushings

2.3 红外热成像检测结果及分析

对 4 种典型故障缺陷套管施加 72.5 kV 电压以及 630 A 电流的红外热成像如图 10 所示。

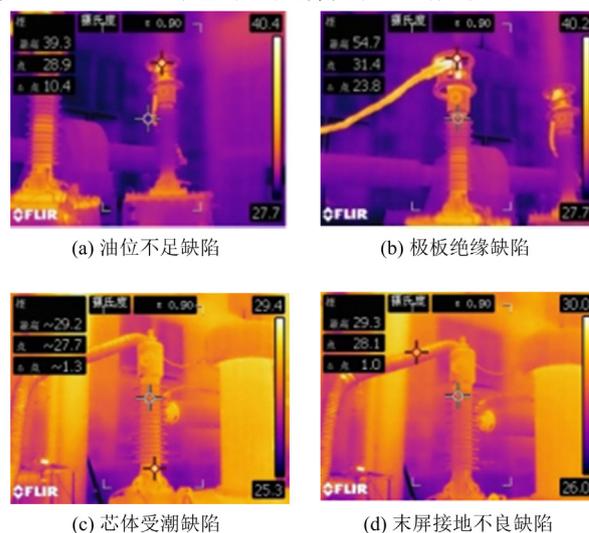


图 10 不同缺陷套管的红外成像图谱

Fig. 10 Infrared imaging spectra of different defect bushings

由图 10 可知, 极板绝缘缺陷套管从室温 26°C 升高至 54.7°C, 且出现了明显的局部过热的现象,

套管上方均压环热量显著高于外部瓷套部分。这是因为极板表面附着了一根细铜丝，破坏了极板的电容结构，使电场发生畸变，产生了较高幅值的局部放电，从而导致芯体温度升高，最终通过热传导效应令瓷套升温过热，而其余缺陷套管温升不明显。由于极板绝缘缺陷套管相对于其他缺陷套管表面温升最显著，通过红外热成像技术可以捕捉并判断该类缺陷。

2.4 典型缺陷油纸绝缘套管频域介电特性及局部放电结果及分析

综合分析 2.1 节—2.3 节的试验结果，典型缺陷套管的绝缘特性在频域介电响应和局部放电图谱中均存在显著差异。此外，明确了在上述 3 种测量方法映射的 4 种典型缺陷特征，如工频介损、复电容、放电量及表面温升，以此对后续模型的建立提供绝缘特征量。

由于水分影响频域介电曲线的整个频带，导致芯体受潮缺陷套管介质损耗曲线远高于其余缺陷套管，且复电容相关曲线在低频部分下降趋势较快。然而，频域介电特性仅能宏观地反映套管的整体绝缘状态，对套管内部缺陷无法较好地判断，需要配合局部放电等方法对套管开展进一步测量。因此，开展局部放电测试，结果表明油位不足缺陷的放电脉冲序列相位主要聚集在 $90^\circ\sim 180^\circ$ 和 $270^\circ\sim 360^\circ$ 相位范围内，分布特性较为明显。极板绝缘缺陷套管由于改变了自身电容结构，导致电场发生畸变，其局部放电脉冲电压幅值大于其余缺陷套管。末屏接地不良缺陷套管的放电信号相位聚集于二、四象限。

3 基于博弈论组合赋权法的缺陷套管绝缘状态评估模型

通过在外施 72.5 kV 电压下不同缺陷套管的电气测试结果可知，套管的固有参数能够表征其绝缘性能，如介质损耗角正切值、套管电容量以及绝缘电阻等。然而，依靠绝缘参量仅定性体现套管绝缘状态。因此，亟待构建评估模型对套管绝缘状态进行定量评估。通过试验所得套管绝缘参数，设置套管绝缘指标量，进而建立基于博弈论组合赋权法的缺陷套管绝缘状态评估模型，以综合评估套管绝缘状态。

3.1 基于层次分析法以及熵权法确定的套管指标量主客观权重

本文通过上述套管相关绝缘状态参量，参考 GB/T4109-2022 相关规定^[23]，结合本文缺陷套管的相关试验结果，建立表 1 所示的缺陷套管运行状态评

分表。基于层次分析法(analytic hierarchy process, AHP)和熵权法(entropy weight method, EWM)组合赋权建立了套管运行状态评估模型。

$$y_i = (a_1x_1 + a_2x_2 + \dots + a_nx_n) \times 100\% \quad (1)$$

式中： y_i 为套管状态评估值； a_i 为各指标量的权重； x_i 为套管绝缘各指标量。

表 1 油浸纸缺陷套管运行状态评分表

Table 1 Rating table for operation status of oil-immersed paper defect bushing

绝缘指标量	未缺陷	轻度缺陷	严重缺陷
工频介损/%	< 0.5	0.5~1	> 1
工频介损偏差值/%	< 20	20~50	> 50
介损平均值/%	< 15	15~60	> 60
2 MHz 介损/%	< 100	100~150	> 150
复电容实部/pF	< 450	450~600	> 600
局部放电密集区相位	无局部放电	一、三象限	整个周期
局部放电脉冲电压幅值/mV	无局部放电	10~100	> 100
套管表面温升/℃	< 5	15~30	> 30

将套管缺陷类型分为 4 种，并设置相关参量作为代表。如油位不足缺陷(F_1)、极板绝缘缺陷(F_2)、芯体受潮缺陷(F_3)、末屏接地不良(F_4)，同时结合测量结果与缺陷类型的关联度，设置故障类型的相关指标量，相关选取结果见表 2。由于不同缺陷的绝缘指标量相同，便不再赘述 F_2 、 F_3 与 F_4 。极板绝缘缺陷(F_2)中的二级指标同 F_1 一致且分别为 X_9 — X_{16} ，芯体受潮缺陷(F_3)中的二级指标分别为 X_{17} — X_{24} ，同理末屏接地不良(F_4)中的二级指标分别为 X_{25} — X_{32} 。

表 2 油浸纸绝缘套管典型缺陷及指标量

Table 2 Typical defects and index of oil-immersed paper insulation bushing

序号	故障类型	指标量	指标量编号
1	油位不足缺陷(F_1)	工频介损	X_1
		工频介损偏差值	X_2
		介损平均值	X_3
		2 MHz 介损	X_4
		复电容实部	X_5
		局部放电密集区相位	X_6
		局部放电脉冲电压幅值	X_7
		套管表面温升	X_8

AHP 包含一致性指标(consistency index, CI)、随机一致性指标(random index, RI)及一致性比例(consistent ratio, CR)。 C_1 越大，判断矩阵的不一致性程度越严重，当 $C_R < 0.1$ 时，表明指标量评分一

致性程度在容许的范围内。使用 AHP 对 $F_1 - F_4$ 4 种不同缺陷下的二级指标量 x_i 进行权重分析, 计算得到权重 $\mathbf{W}'_1 = [0.3135, 0.2067, 0.0226, 0.0594, 0.1391, 0.1389, 0.0888, 0.0311]$ 。此外, λ 为判断矩阵的最大特征根, n 为指标量矩阵维数, C_1 与 C_R 的表达式如式(2)和式(3)所示。进而根据 R_1 表查到对应的数值为 1.404。因此 $C_R = C_1 / R_1 = 0.0292 \leq 0.1$, 通过一致性检验。

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

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

以上述为基础, 对套管不同缺陷($F_1 - F_4$)一级指标进行评估, 相对于二级指标的不同权重 $\mathbf{W}_1 = [0.0928, 0.4053, 0.4128, 0.0891]$, 即基于 AHP 评估所得不同缺陷套管绝缘状态的最终主观权重。

为了避免 AHP 主观因素对最终评估的影响, 本文采用了客观的 EWM 作为补充分析。EWM 计算过程中包含信息熵值 e_j 与信息效用值 d_j 。计算过程如式(4)一式(9)所示, 最终计算结果如表 3 所示。可见工频介损、工频介损偏差值在 4 种缺陷下保持相对稳定, 信息熵值较大, 包含的绝缘信息相对较少。而局部放电密集区相位与局部放电脉冲幅值变化较大, 信息熵值较小, 包含的信息更多, 对绝缘状态的信息权重影响较大。因此不同缺陷的一级客观指标权重为 $\mathbf{W}_2 = [0.2328, 0.2537, 0.3581, 0.1553]$ 。

表 3 油浸纸绝缘套管典型缺陷 EWM 二级指标量权重值

Table 3 Weight value of EWM secondary index of oil-immersed

paper insulation bushing by typical defects

绝缘指标量	信息熵值 e_j	信息效用值 d_j	权重
工频介损	0.802	0.198	0.1159
工频介损偏差值	0.801	0.199	0.1169
介损平均值	0.793	0.207	0.1268
2 MHz 介损	0.792	0.208	0.1269
局部放电密集区相位	0.769	0.231	0.1414
局部放电脉冲电压幅值	0.646	0.354	0.2167
工频复电容实部	0.980	0.003	0.0211
套管表面温升	0.781	0.219	0.1342

$$z_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}}{\max\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\} - \min\{x_{1j}, x_{2j}, \dots, x_{nj}\}} \quad (4)$$

$$y_{ij} = \frac{z_{ij}}{\sum_{i=1}^n x_{ij}}, \quad i, j \in [1, n] \quad (5)$$

$$k = \frac{1}{\ln n} \quad (6)$$

$$e_j = k \sum_{i=1}^n y_{ij} \ln y_{ij} \quad (7)$$

$$d_j = 1 - e_j \quad (8)$$

$$w_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^n d_j} \quad (9)$$

式中: z_{ij} 为正向化矩阵; x_{ij} 为绝缘指标量; y_{ij} 为归一化数值; k 为比例系数; w_j 为最终权重。

3.2 套管绝缘指标量权重确定的博弈论组合赋权评估模型

在经过 AHP 以及 EWM 计算套管绝缘指标量权重后, 得到的主客观权重引入博弈论的思想进行组合赋权, 这样既兼顾了专家主观评估以及指标量客观评估, 也使得评估结果更为准确。本文上述 AHP 指标权重 $\mathbf{W}_1 = [\mathbf{W}_{11}, \mathbf{W}_{12}, \dots, \mathbf{W}_{1n}]$ 以及 EWM 指标权重 $\mathbf{W}_2 = [\mathbf{W}_{21}, \mathbf{W}_{22}, \dots, \mathbf{W}_{2n}]$ 认为是博弈的双方, 最佳的状态评估权重为两者处于博弈的平衡状态。应满足 \mathbf{W}_1 、 \mathbf{W}_2 与最优组合权重的离差之和最小, 即为双方博弈平衡, 求解如下。

1) 式(10)展示了 \mathbf{W}_1 、 \mathbf{W}_2 线性组合而成的指标组合权重向量 \mathbf{W} 。

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \lambda_1 \omega_{11} + \lambda_2 \omega_{21} \\ \lambda_1 \omega_{12} + \lambda_2 \omega_{22} \\ \vdots \\ \lambda_1 \omega_{1n} + \lambda_2 \omega_{2n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{11} & \omega_{21} \\ \omega_{12} & \omega_{22} \\ \vdots & \vdots \\ \omega_{1n} & \omega_{2n} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \lambda_1 \mathbf{W}_1 + \lambda_2 \mathbf{W}_2 \quad (10)$$

式中, λ_1 、 λ_2 为线性组合系数。

2) 基于博弈论的核心思想, 以双方博弈平衡为目标, 使权重 \mathbf{W} 与 \mathbf{W}_1 、 \mathbf{W}_2 离差之和最小, 寻找最优的线性组合系数 λ_1^* 、 λ_2^* , 从而得到最优组合权重 \mathbf{W}^* 。目标函数及约束条件如式(11)所示。

$$\begin{cases} \min(\|\mathbf{W} - \mathbf{W}_1\|_2 + \|\mathbf{W} - \mathbf{W}_2\|_2) = \\ \min(\|\lambda_1 \mathbf{W}_1 + \lambda_2 \mathbf{W}_2 - \mathbf{W}_1\|_2 + \|\lambda_1 \mathbf{W}_1 + \lambda_2 \mathbf{W}_2 - \mathbf{W}_2\|_2) \\ \lambda_1 + \lambda_2 = 1, \lambda_1, \lambda_2 \geq 0 \end{cases} \quad (11)$$

3) 依据微分学, 式(11)取得最小一阶导数的约束条件如式(12)所示。

$$\begin{cases} \lambda_1 \mathbf{W}_1 \mathbf{W}_1^T + \lambda_2 \mathbf{W}_1 \mathbf{W}_2^T = \mathbf{W}_1 \mathbf{W}_1^T \\ \lambda_1 \mathbf{W}_2 \mathbf{W}_1^T + \lambda_2 \mathbf{W}_2 \mathbf{W}_2^T = \mathbf{W}_2 \mathbf{W}_2^T \end{cases} \quad (12)$$

4) 对式(12)所得线性组合系数 λ_1 、 λ_2 归一化, 可得

$$\begin{cases} \lambda_1^* = \frac{|\lambda_1|}{|\lambda_1| + |\lambda_2|} \\ \lambda_2^* = \frac{|\lambda_2|}{|\lambda_1| + |\lambda_2|} \end{cases} \quad (13)$$

最终得到所求指标量最优组合权重为

$$W^* = \lambda_1^* W_1 + \lambda_2^* W_2 \quad (14)$$

由式(12)可得权重组合系数 $\lambda_1 = 1.3264$ 、 $\lambda_2 = 0.4007$ ，归一化可得 $\lambda_1^* = 0.7680$ 、 $\lambda_2^* = 0.2320$ ，因此套管一级指标量 ($F_1 - F_4$) 最优组合权重 $W_1^* = [0.1253, 0.3701, 0.4001, 0.1045]$ 。套管绝缘二级指标量最优组合权重 $W_2^* = [0.2677, 0.1859, 0.0467, 0.0750, 0.1395, 0.1569, 0.0731, 0.0551]$ 。

根据评分模型及博弈论组合赋权法评估正常运行套管以及绝缘缺陷套管的运行状态参数及权重，得到结果如表 4 与表 5 所示。本文采用半三角半梯形隶属度函数反映评估得分与套管绝缘状态的联系，并引入得分算子 l 如式(15)所示。隶属度函数 $r(l)$ 表征数据结果的隶属关系，多用模糊集合表示。将套管不同绝缘状态分为“正常”、“注意”、“异常”与“严重”，分别对应于 $r_1(l)$ 、 $r_2(l)$ 、 $r_3(l)$ 及 $r_4(l)$ ，计算公式如式(16)一式(19)所示。本文采取半三角形半梯形的隶属度函数，其函数分布如图 11 所示。

表 4 油浸纸正常套管运行状态参数及权重

Table 4 Operating state parameters and weights of normal oil-immersed paper bushing

指标量	测试数值	组合权重指数
工频介损	0.312%	0.3143
工频介损偏差值	12.3%	0.2056
介损平均值	14%	0.0217
2 MHz 介损	83%	0.0381
复电容实部	340 pF	0.1522
局部放电密集区相位	无局部放电	0.0921
局部放电脉冲电压幅值	无局部放电	0.1221
套管表面温升	1.5 °C	0.0539

表 5 油浸纸缺陷套管运行状态参数及权重

Table 5 Operating state parameters and weights of oil-immersed paper defect bushing

指标量	测试数值	组合权重指数
工频介损	0.667%	0.2857
工频介损偏差值	62.5%	0.1901
介损平均值	20%	0.0542
2 MHz 介损	120%	0.0634
复电容实部	550 pF	0.1296
局部放电密集区相位	一、三象限	0.1528
局部放电脉冲电压幅值	300 mV	0.0690
套管表面温升	15 °C	0.0552

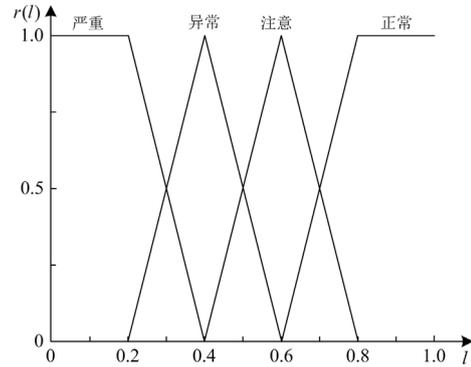


图 11 半三角形半梯形隶属度函数

Fig. 11 Membership function of half triangle and half trapezoid

$$l = a_1 x_1 + a_2 x_2 + \dots + a_i x_i \quad (15)$$

式中， a_i 是各指标量的权重。

$$r_1(l) = \begin{cases} 1 & l \geq 0.8 \\ 5l - 3 & 0.6 < l < 0.8 \\ 0 & l \leq 0.6 \end{cases} \quad (16)$$

$$r_2(l) = \begin{cases} 4 - 5l & 0.6 \leq l < 0.8 \\ 5l - 2 & 0.4 < l < 0.6 \\ 0 & l \geq 0.8 \text{ 或 } l \leq 0.4 \end{cases} \quad (17)$$

$$r_3(l) = \begin{cases} 3 - 5l & 0.4 \leq l < 0.6 \\ 5l - 1 & 0.2 < l < 0.4 \\ 0 & l \geq 0.6 \text{ 或 } l \leq 0.2 \end{cases} \quad (18)$$

$$r_4(l) = \begin{cases} 0 & l \geq 0.4 \\ 2 - 5l & 0.2 < l < 0.4 \\ 1 & l \leq 0.2 \end{cases} \quad (19)$$

由式(15)一式(19)可知，正常运行套管绝缘状态属于“正常”时的隶属度为 1，属于“注意”、“异常”和“严重”时的隶属度为 0，表明该套管绝缘状态处于正常状态，绝缘水平良好，符合运行要求。缺陷套管绝缘状态属于“正常”时的隶属度为 0.158，属于“注意”时的隶属度为 0.843，属于“异常”和“严重”时的隶属度为 0，表明该套管绝缘状态受损，需要进行检查维护方可继续投入使用。

进一步，通过上述计算结果可获得套管运行状态评估结果，如表 6 所示。由表 6 结果纵向对比可知，无论是单一赋权法，还是组合赋权法，正常套管评分均高于极板绝缘缺陷套管评分。由评分结果可以得知，得分较高者绝缘状态正常，得分较低的套管产生绝缘缺陷，可见该组合赋权评估模型对油浸纸套管绝缘状态有较为准确的评估。

此外，由表 6 结果横向对比可知，组合赋权法得到的套管绝缘状态得分在 AHP 与 EWM 之间。由于 AHP 主观性较强，导致套管绝缘状态评分过高。

表 6 套管运行状态评估结果

Table 6 Evaluation results of bushing operation status

绝缘状态	评分值		
	AHP	EWM	组合赋权
正常	88.012	86.063	87.178
缺陷	65.134	61.238	63.156

而 EWM 过于客观, 对于需要主观评判的套管绝缘指标量处理结果不佳, 导致评分较低。组合赋权法相对于 AHP 更加客观, 且综合了 EWM 的评估权重, 吸取了 AHP 与 EWM 的优点, 有效地避免了单一赋权方法评估片面且不准确的问题, 具备更高的有效性及可靠性。

3.3 基于多源融合的油纸绝缘缺陷套管状态评估

上述频域介电测试、局部放电测试以及套管绝缘状态评估模型, 能有效判别油纸绝缘套管运行工况下的典型缺陷, 并根据相关指标量进行套管绝缘状态评估, 辨识流程如图 12 所示。

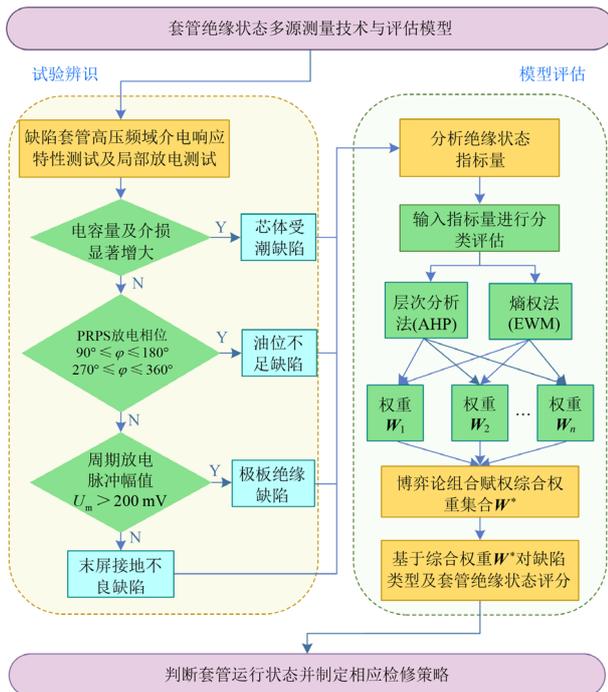


图 12 基于多源融合的油纸绝缘套管缺陷辨识及评估流程

Fig. 12 Defect identification and assessment process of oil-immersed paper insulation bushing based on multi-source fusion

需要补充说明: 本文建立的套管绝缘状态评估模型及相关缺陷辨识技术已尽可能考虑理论研究、规定标准及试验经验, 但收集用于建模所需数据仍较为有限, 后续将继续补充建模数据, 拓宽模型使用场景, 使模型更具有普适性。

4 结论

本文模拟了套管实际运行工况下 4 种典型缺陷, 开展了频域介电响应测试及局部放电特性测量, 并根据相关绝缘指标量建立了套管绝缘状态评估模型, 主要结论如下。

1) 在频域介电响应测试中, 水分对频域介电曲线影响较大, 受潮缺陷套管曲线相较于正常套管会出现明显的上升。结果发现, 芯体受潮套管的介损值及电容量远高于其他缺陷套管, 电容量在低频部分相较于其余缺陷套管曲线显著增大。

2) 在特高频局部放电测试中, 油位不足缺陷套管的 PRPS 局部放电信号在 $90^\circ \sim 180^\circ$ 和 $270^\circ \sim 360^\circ$ 相位产生明显的聚集。而其余缺陷套管放电相位遍布整个周期, 无规律呈现。此外, 极板绝缘缺陷套管局部放电脉冲峰值大于 200 mV, 而其余缺陷套管均在 60 mV 以下。

3) 基于博弈论组合赋权法的缺陷套管绝缘状态评估模型, 弥补了传统评估方法在赋权方面较为单一的缺陷, 评估结果更科学有效。应用该模型对套管绝缘状态进行评估, 缺陷套管绝缘状态得分低于正常套管, 且在隶属度函数上同样体现出绝缘性能下降, 由此可判断套管绝缘受损。通过油浸纸套管频域介电响应测试与局部放电测试, 可有效地辨识出油浸纸绝缘套管典型故障缺陷, 完善了套管绝缘状态评估体系。

参考文献

- [1] WANG D, ZHOU L, DAI C, et al. Insulation defect diagnostic method for OIP bushing based on multiclass LS-SVM and cuckoo search[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2019, 69(1): 163-172.
- [2] 陈铁, 冷昊伟, 李咸善, 等. 基于油中气体分析与类重叠特征的变压器分层故障诊断模型[J]. 中国电力, 2022, 55(7): 22-32, 41. CHEN Tie, LENG Haowei, LI Xianshan, et al. Transformer hierarchical fault diagnosis model based on dissolved gas analysis of insulating oil and class overlap features[J]. Electric Power, 2022, 55(7): 22-32, 41.
- [3] 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.
- [4] 尚海昆, 李宇才, 林伟. 基于 EWT-MQE 的变压器局部放电特征提取[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(14): 161-171. SHANG Haikun, LI Yucai, LIN Wei. Partial discharge feature extraction of a transformer based on EWT-MQE[J].

- Power System Protection and Control, 2022, 50(14): 161-171.
- [5] AZAB M. High performance decoupled active and reactive power control for three-phase grid-tied inverters using model predictive control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2021, 6(1): 1-19.
- [6] 何物, 何紫薇, 江力强, 等. 多重不确定性对特高压变压器瓷套管地震失效风险的影响[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5763-5775.
HE Chang, HE Ziwei, JIANG Liqiang, et al. Effects of different sorts of uncertainties on seismic failure risk of ultra-high-voltage porcelain transformer bushing[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5763-5775.
- [7] 王艳, 李伟, 赵洪山, 等. 基于油中溶解气体分析的 DBN-SSAELM 变压器故障诊断方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(4): 32-42.
WANG Yan, LI Wei, ZHAO Hongshan, et al. Transformer DGA fault diagnosis method based on DBN-SSAELM[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(4): 32-42.
- [8] TENBOHLEN S, JAGERS J, VAHIDI F. Standardized survey of transformer reliability: on behalf of CIGRE WG A2.37[C] // 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials, September 11-15, 2017, Toyohashi, Japan: 593-596.
- [9] CHEN L, WU X, TIAN Y, et al. PD defect monitoring for oil-impregnated paper bushing by measuring the inner pressure[J]. IEEE Access, 2019, 7: 53411-53418.
- [10] WANG Q, LIAO J, TIAN H, et al. Regularity analysis of the temperature distribution of epoxy impregnated paper converter transformer bushings[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(5): 3254-3264.
- [11] 贾磊, 王婷婷, 肖微, 等. 基于油枕空气湿度感知的变压器套管受潮在线监测方法[J]. 高电压技术, 2020, 46(9): 3114-3123.
JIA Lei, WANG Tingting, XIAO Wei, et al. On-line monitoring method for transformer bushings with moisture based on air humidity perception in conservator[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(9): 3114-3123.
- [12] LIU J, DING Z, FAN X, et al. A BPNN model-based Adaboost algorithm for estimating inside moisture of oil-paper insulation of power transformer[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2022, 29(2): 614-622.
- [13] 廖瑞金, 杜永永, 高竣, 等. 受潮对油纸电容式套管频域介电响应的影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 8-12.
LIAO Ruijin, DU Yongyong, GAO Jun, et al. Effect of moisture content on dielectric frequency domain response of oil-paper condenser bushing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 8-12.
- [14] 韩宝国, 马驰, 李静鹏, 等. 基于 DTCWT 与 LLE 算法的变压器局部放电特高频信号特征参数提取方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 65-72.
HAN Baoguo, MA Chi, LI Jingpeng, et al. A feature parameters extraction method of PD UHF signal based on DTCWT and LLE algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 65-72.
- [15] CHENG J, XU Y, DING D, et al. Investigation of the UHF partial discharge detection characteristics of a novel bushing tap sensor for transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2020, 36(5): 2748-2757.
- [16] 周加斌, 陈玉峰, 井雨刚, 等. 特高压变压器磁屏蔽接地线断裂引起局部放电异常的检测与分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 110-115.
ZHOU Jiabin, CHEN Yufeng, JING Yugang, et al. Detection and analysis of abnormal partial discharge caused by the fracture of magnetic shielding ground line in UHV transformer[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 110-115.
- [17] 许渊, 刘卫东, 陈维江, 等. GIS 绝缘子局部放电高灵敏测量方法及应用[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(5): 1703-1712.
XU Yuan, LIU Weidong, CHEN Weijiang, et al. High-sensitivity measurement method and application of GIS spacer partial discharge[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(5): 1703-1712.
- [18] CHEN Jinqiang. Fault prediction of a transformer bushing based on entropy weight TOPSIS and gray theory[J]. Computing in Science & Engineering, 2018, 21(6): 55-62.
- [19] 高书堃, 安泰, 宋剑. 基于熵权-正态云模型的智能电表状态评估研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(1): 190-194.
GAO Shuyao, AN Tai, SONG Jian. Status evaluation of smart meter based on entropy weight-normal cloud model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(1): 190-194.
- [20] 余长厅, 黎大健, 陈梁远, 等. 基于博弈论组合赋权和云模型的有载分接开关状态评估[J]. 变压器, 2021, 58(12): 46-50.
YU Zhangting, LI Dajian, CHEN Liangyuan, et al. Condition assessment method of the OLTC based on the combined weighting through game theory and cloud model[J]. Transformer, 2021, 58(12): 46-50.
- [21] 刘文霞, 王丽娜, 张帅, 等. 基于合作博弈论的日前自备电厂与风电发电权交易模型[J]. 电网技术, 2022, 46(7): 2647-2658.
LIU Wenxia, WANG Lina, ZHANG Shuai, et al. Cooperation game theory-based model for trading of power generation rights between former captive power plants and wind power[J]. Power System Technology, 2022, 46(7): 2647-2658.
- [22] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 交流电压高于 1000 V 的套管: GB/T 4109—2022[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration. Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V: GB/T 4109—2022[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.

收稿日期: 2023-03-15; 修回日期: 2023-06-28

作者简介:

郑含博(1984—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为电气设备状态监测与智能诊断、电工绝缘新材料、智能配电网及新能源应用等; E-mail: hanbozheng@163.com

敬佳兴(1998—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电气设备绝缘在线监测与状态诊断。E-mail: jiaxingjing929@163.com

(编辑 张颖)