

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.09.014

基于有限元分析的油纸绝缘套管不均匀受潮FDS特性研究

姜炯挺¹, 李超¹, 冯馨缘¹, 许璐琳², 张大宁²

(1. 国网浙江省电力有限公司宁波供电公司, 浙江 宁波 315016; 2. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室, 西安 710049)

摘要: 针对传统频域介电谱(FDS)分析基于均匀受潮假设,难以准确反映油纸绝缘套管实际存在的不均匀受潮问题,提出了一种基于有限元仿真与实验相结合的不均匀受潮介电响应分析方法。利用Comsol建立双单元叠层FDS仿真模型,并建立套管的均匀与不均匀受潮模型,系统分析水分含量及其空间分布对介电响应的影响。结果表明,不均匀受潮会使 $\tan\delta$ - f 曲线出现明显损耗峰及波动特征,且不均匀程度越大,损耗峰频率及曲线交点频率越高,介电响应对末屏局部受潮较为敏感。仿真与实验一致性良好,为油纸绝缘不均匀受潮状态的识别与定量评估提供了新的技术手段,对提升电力设备绝缘状态精准诊断具有重要意义。

关键词: 油纸绝缘; 不均匀受潮; 频域介电谱; 有限元分析; 套管; 水分; 介电常数; 状态评估

Study on FDS Characteristics of Oil-paper Insulated Bushing Under Non-duniform Moisture Contents Based on Finite Element Analysis

JIANG Jiongting¹, LI Chao¹, FENG Xinyuan¹, XU Lulin², ZHANG Daning²

(1. State Grid Zhejiang Power Co., Ltd., Ningbo Power Supply Company, Zhejiang Ningbo 315016, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In view of the issue that the traditional frequency domain spectroscopy (FDS) analysis is based on the assumption of uniform moisture ingress, which make it difficult to accurately reflect the non-uniform moisture distribution actually existed in oil paper insulated bushings, a dielectric response analysis method for non-uniform moisture ingress is proposed based on the combination of finite element simulation with experimental validation. A dual-unit stacked FDS simulation model is established using Comsol, along with uniform and non-uniform moisture distribution models for the bushing. The effects of moisture content and its spatial distribution on the dielectric response are systematically analyzed. The results indicate that non-uniform moisture induces distinct loss peaks and fluctuation characteristics in the $\tan\delta$ - f curves. The greater the degree of non-uniformity, the higher the frequencies of the loss peak and the curve intersection point, indicating that the dielectric response is relatively sensitive to localized moisture end screen. Both simulations and experiments are in good agreement, which provides a new technical means for identifying and quantitatively assessing non-uniform moisture distribution in oil-paper insulation, and is of great significance for advancing accurate insulation diagnosis of power equipment.

Key words: oil-paper insulation; non-uniform moisture; frequency domain spectroscopy (FDS); finite element analysis; bushing; moisture; permittivity; condition assessment

0 引言

中国的电力行业发展迅速,对电力能源持续增加的巨大需求推动着电网向更高安全、高可靠性的

方向发展^[1-7]。油浸纸套管作为电力变压器不可或缺的外部连接组件,承担着电气连接、通流和机械支撑等多重功能,其绝缘状态直接影响变压器的安全运行^[8-13]。据统计,全球约69%的变压器套管为油

收稿日期:2026-03-11; 修回日期:2026-05-09

基金项目:国家自然科学基金面上项目(52477027)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52477027).

浸纸套管,而约37.8%的变压器故障与套管故障相关,套管故障已成为引发变压器停运甚至火灾爆炸事故的重要原因^[14-18]。其中,因受潮或老化导致的套管事故比例超过40%,且随电压等级升高呈增大趋势^[19-23]。不仅会直接导致变压器停电,甚至可能因炸裂引发火灾并损伤本体,造成巨大损失,而现有的预防性试验因无法有效反映其受潮与老化缺陷,易导致设备带病运行,威胁电网安全^[24]。

目前,油纸绝缘套管状态评估仍以电容量测试、介质损耗因数、绝缘电阻等预防性测试为主^[25]。但这些方法对内部局部缺陷和非均匀绝缘劣化的敏感性不足,且试验电压远低于实际运行电压,难以充分表征复杂运行条件下绝缘内部的真实状态^[26]。特别是对于局部受潮或非均匀受潮情况,由于其空间分布复杂、极化过程差异明显,传统介损测试难以实现准确定位和定量分析。因此,研究反映油纸绝缘内部介电特性变化的无损检测方法已成为当前绝缘诊断领域的重要研究方向。

频域介电谱测试(FDS)因试验电压低、抗干扰能力强、信息丰富等优点,受到广泛关注^[27]。研究表明,FDS能够有效反映油纸绝缘中的极化、导电及界面响应过程,对受潮与老化缺陷具有较高敏感性。Fofana^[28]等发现随着老化程度的加深或水分含量的增加,油浸纸的介损角正切值均会增大,且介损角正切的均值与含水量呈现正相关,同时指出水分与老化影响相似,难以区分。Shayegani^[29]等人认为水分影响油浸纸频域介电谱测试的整个频段,而Lundgaard^[30]等人认为频域介电谱高频段受水分影响较小。

随着研究深入,越来越多学者开始关注非均匀受潮条件下油纸绝缘介电响应特性的变化规律。由于实际运行过程中水分扩散受温度梯度、电场分布以及油纸结构影响,套管内部水分往往呈现明显的空间非均匀分布^[31-32]。Su等^[14,33]基于有限元模型分析了轴向和径向不均匀受潮条件下套管的介电响应规律,指出水分空间分布对整体介电响应具有显著影响。此外,部分研究指出局部受潮会在界面引入额外松弛极化损耗峰,且受潮程度越大,损耗峰幅值越大并向高频移动^[34-35]。后续研究结合等效模型、数值仿真及智能识别方法对受潮套管的FDS特性进行了分析^[36-37]。Peng Yu等^[38]基于损耗谱结构不敏感频率点,提出了一种不依赖绝缘结构参数的变压器受潮状态评估方法,该方法无需输入油道和撑条等结构参数即可实现水分含量的定量评估。国内相关学者^[39]认为水分影响较老化更为突出,但

当前套管水分评估多限于均匀受潮,缺乏对非均匀受潮的系统分析。

鉴于此,文中基于Comsol有限元分析平台建立了油纸绝缘受潮仿真模型,包括双单元叠层模型、套管末屏局部受潮模型以及套管均匀、不均匀受潮模型,同时在实验室内构建了不均匀受潮实物模型,开展频域介电谱测试。通过分析不同含水量及水分空间分布条件下的 $\tan\delta$ - f 曲线变化规律,研究局部受潮与界面极化引起的特征损耗峰演化机制,从而为油纸绝缘套管不均匀受潮状态识别与定量评估提供理论依据。

1 不同受潮程度下油纸绝缘的有限元分析

1.1 有限元模型建立

为系统研究水分含量及其空间分布对油纸绝缘套管FDS特性的影响,文中利用Comsol有限元分析软件,构建了多组油纸绝缘仿真模型。本节从模型参数、边界条件、激励及网格设置对模型进行详细说明。

1.1.1 仿真模型参数设置

单元叠层模型可看作油浸式套管电容心子中油纸绝缘结构的基本组成单元。为模拟套管中油纸绝缘与铝箔电容屏交替分布的层叠结构,文中采用厚度为0.13 mm的绝缘纸制备统一规格(600 mm×100 mm)的条形纸样,并通过折叠叠放的方式形成油纸绝缘单元。在两组油纸绝缘单元之间贴合同规格铝箔,可构成一个基本叠层结构,多个基本单元继续叠加后,可得到不同叠层厚度的多单元叠层模型。纸样及叠层结构见图1,其中单元叠层厚度约为1.04 mm,与油浸式套管中相邻电容屏之间的最小油纸绝缘厚度相近,可用于表征套管电容心子的局部绝缘结构。



图1 电缆纸单元叠层实物图

Fig. 1 Photograph of laminated unit stacks of cable paper

将裁剪后的纸样均匀铺放于干燥锅内,并置于真空干燥箱中心,避免干燥锅与箱体内壁直接接触。干燥前,先用酒精擦拭箱体内部,并在105℃下抽真空预干燥5 h。随后对绝缘纸进行72 h真空干燥处理,期间于干燥24 h后擦拭箱体内部水分。干燥结束后,绝缘纸含水量低于0.5%。油的干燥过程

与绝缘纸类似,二者在不同的烘箱中干燥。之后,采用称重法制备了不同含水量的均匀受潮油纸绝缘样品,经卡尔—费休滴定法测试,样品实际水分含量分别为0.53%、1.08%、2.01%、3.09%、4.11%、5.12%,为便于描述,分别记为 MC_0 、 MC_1 、 MC_2 、 MC_3 、 MC_4 、 MC_5 。实验采用DIRANA介电响应测试仪测量不同含水量油浸纸样品的频域介电参数,获得其复介电常数随频率变化的实部和虚部曲线见图2。测试结果表明,含水量升高会改变油浸纸的频域介电响应,其中复介电常数实部主要在中低频段发生变化,复介电常数虚部则随含水量增加在测试频段内整体增大。

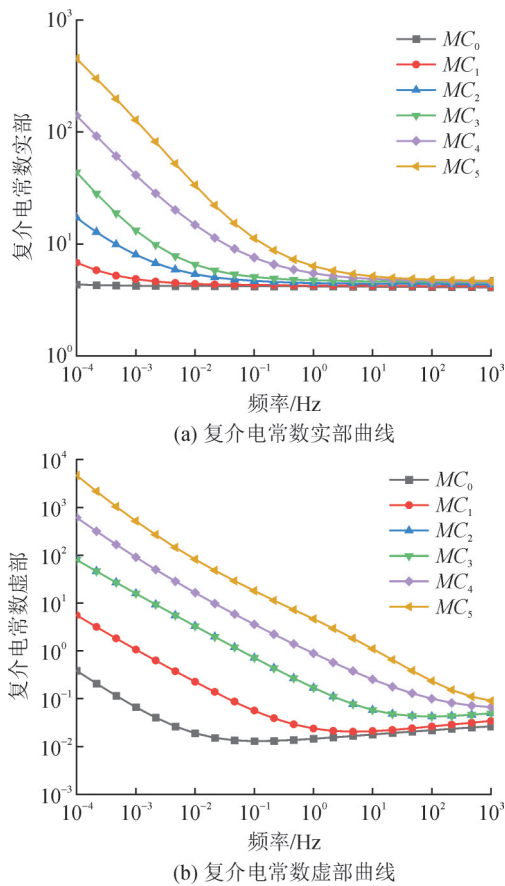


图2 50 °C下单元叠层均匀受潮时各含水量对应的复介电常数曲线

Fig. 2 Complex permittivity of uniformly moisturized laminated unit stacks at different moisture contents at 50 °C

在有限元仿真中,将上述不同含水量油浸纸样品的复介电常数测试结果作为频率相关材料参数输入模型,以表征不同受潮状态下油浸纸的介电特性。绝缘油区域根据文献参数进行设置,本仿真所用绝缘油体积电导率为 $3.6 \times 10^{-12} \text{ S/m}$ (50 °C)^[40],通过对仿真模型内的介质赋予相应的介电常数信息可模拟不同水分含量下油浸纸样品的材料特性。

为了使得仿真模型与实验室实物模型FDS测

试结果保持一致性,构建了与实验双单元叠层模型相同尺寸完全一致的二维轴对称仿真模型见图3。模型的主要几何结构见图1,其中介质层的介质1和介质2厚度均为1.04 mm,材料为油浸绝缘纸;介质中间设置铝箔分隔层,高压电极位于模型上端,测量电极位于模型下端,均采用理想导体边界条件;多单元叠层模型(如十单元叠层)可在该双单元模型基础上通过重复添加铝箔—介质单元获得,以模拟实际套管中多层电容屏的绝缘结构。依据受潮类型的不同,仿真模型分为均匀受潮与不均匀受潮模型两类。

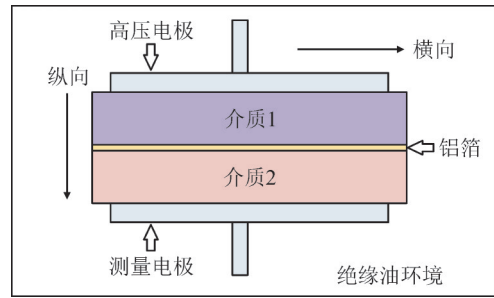


图3 仿真模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the simulation model

为便于描述,定义水分分布不均匀度见式(1)。均匀受潮时不均匀度为0;不均匀度越大,表示内部水分分布差异越大。为方便计算,令 MC_0 至 MC_5 代表的实际水分含量近似用1%至5%整数替代。

$$I = \frac{1}{n} \sum |MC_i - MC_{\text{avg}}|^2 \quad i = 1, 2, 3, \dots, n \quad (1)$$

式(1)中: I 为不均匀度; MC_{avg} 为平均含水量; MC_i 为各叠层含水量; n 为总叠层数。

1.1.2 方程、激励与网格设置

FDS测试是在不同频率下获得绝缘结构复介电响应的测试方法。由于文中所研究频率范围较低,电磁波传播效应对计算结果影响较小,因此在有限元仿真中将FDS测试过程等效为频域准静态电场问题进行求解。模型控制方程为:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \quad (2)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} + j\omega \varepsilon_0 \varepsilon_r \mathbf{E} \quad (3)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla U \quad (4)$$

式(2)-(4)中: $\mathbf{J}$ 为电流密度; σ 为介质电导率; $\mathbf{E}$ 为电场强度; $\omega = 2\pi f$ 为角频率, f 为测试频率; ε_0 为真空介电常数; ε_r 为相对介电常数; U 为电位。由上述方程可知,油纸绝缘在频域下的电流响应主要由电导电流和位移电流共同决定,其中电导率主要反映介质的电导损耗,相对介电常数主要影响介质的极化响应。

高压电极施加电压激励,测量电极接地,侧边

界设为电绝缘边界。仿真中电导损耗通过材料电导率表征,极化损耗通过复介电常数虚部表征,界面极化损耗由不同受潮区域之间介电参数和电导率差异自动形成。仿真电压设置为正弦交流电压,峰值200 V,测试频带宽度为0.1 mHz~1 kHz,频率测试值与介电响应测试设备实测值相同。

求解过程中采用频域计算方法,在与实验FDS测试一致的频率范围内进行对数频率扫描。对于每一个频率点,有限元模型首先求解电位分布和电流密度分布,然后对测量电极表面的法向电流密度进行积分,得到该频率下的总电流 $I(\omega)$ 。根据外施电压 $U(\omega)$ 与测量电流 $I(\omega)$,可计算模型的复导纳

$$Y(\omega) = \frac{I(\omega)}{U(\omega)} = G(\omega) + j\omega C(\omega) \quad (5)$$

式(5)中: $Y(\omega)$ 为复导纳; $G(\omega)$ 为等效电导; $C(\omega)$ 为等效电容。进一步可得到模型在不同频率下的等效电容和介质损耗角正切:

$$C(\omega) = \frac{\text{Im}[Y(\omega)]}{\omega} \quad (6)$$

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\text{Re}[Y(\omega)]}{\text{Im}[Y(\omega)]} \quad (7)$$

在网格剖分方面,最大网格尺寸设置为最小波长的1/10,并对介质层界面及电极边缘进行局部加密(最大尺寸不超过0.05 mm),求解器采用AC/DC模块下的频域求解器,双单元叠层仿真模型的局部网格剖分见图4。

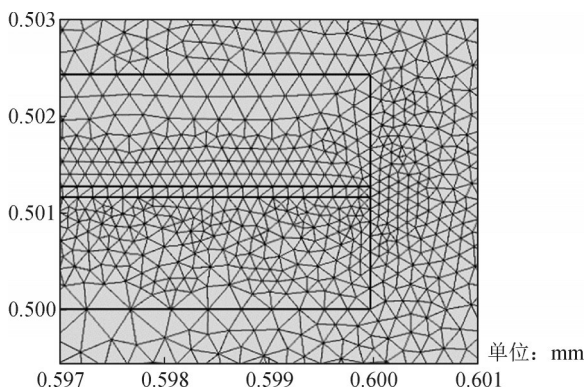


图4 仿真模型局部网格剖分图

Fig. 4 Local mesh generation of the simulation model

1.2 双单元叠层受潮模型FDS仿真

在构建双单元叠层模型时,按照高压电极、测量电极与样品相对位置的区别,将两个单元按上下顺序堆叠,即低水分在上侧。如表1所示,得到了纵向组合时等效含水量分别为:1%、2%、3%、4%的组合,搭建不均匀受潮仿真模型时,只需将不同含水量的介电参数按照组合形式进行赋值即可。FDS仿真测试时,仿真电压峰值为200 V正弦交流电,测试

频带宽度与实际测试相同,为0.1 mHz~1 kHz。

表1 双单元叠层模型各层等效含水量设定

(上层:介质1,下层:介质2)

Table 1 Equivalent moisture content combinations for the dual-unit laminated oil-paper insulation simulation model (upper layer: dielectric 1, lower layer: dielectric 2)

等效含水量1%		等效含水量2%		等效含水量3%		等效含水量4%	
组合形式	不均匀度	组合形式	不均匀度	组合形式	不均匀度	组合形式	不均匀度
MC_0+MC_2	1	MC_0+MC_4	4	MC_1+MC_5	4	MC_3+MC_5	1
MC_1+MC_1	0	MC_1+MC_3	1	MC_2+MC_4	1	MC_4+MC_4	0
		MC_2+MC_2	0	MC_3+MC_3	0		

仿真模型的FDS测试结果见图5,由图5可以看出,油纸绝缘在均匀受潮与不均匀受潮两种状态下表现出不同的频域介电响应特征。均匀受潮情况下,介损随频率变化整体较为平滑;而在水分分布不均匀条件下,曲线会出现明显的弛豫峰,表明体系内部界面极化作用增强。这是因为,当各层介电常数和电导率差异较大时,界面极化效应会在特定频率范围内引起附加损耗,从而形成峰值特征。与此同时,损耗峰对应的特征频率逐渐向高频移动,而峰值幅度则呈下降趋势。这表明随着不均匀度增大,损耗峰对应的特征频率逐渐向高频移动,而峰值幅度下降,表明界面极化的等效弛豫时间缩短,损耗贡献趋于向较宽频率范围内分散,导致峰值降低而峰宽增大。此外,随着不均匀度的增大,不均匀受潮曲线与均匀受潮曲线之间出现交点,且交点频率逐渐向高频方向移动。在交点左侧的中低频段,不均匀受潮曲线幅值低于均匀受潮曲线;在交点右侧,不均匀受潮曲线幅值高于均匀受潮曲线,说明水分分布形式会改变油纸绝缘体系的频域损耗分布。

综上所述,在相同等效含水量下,随着模型不均匀度的增大, $\tan \delta$ - f 曲线波动更加明显,介质损耗峰对应的频率逐渐增大,而峰值幅值降低。这表明水分分布不均匀程度增大后,油纸绝缘体系的损耗贡献不再集中于较低频段,而是向较宽频率范围内重新分布。当不均匀度相同时,模型等效含水量越大, $\tan \delta$ - f 曲线的损耗峰频率越高,说明含水量升高会进一步增强油纸绝缘介电参数差异对频域损耗特性的影响。由此可见,损耗峰频率同时受水分含量和空间分布影响,而峰值幅值则主要反映受潮非均匀程度。因此, $\tan \delta$ - f 曲线中的损耗峰位置、峰值大小以及交叉频率均能够有效表征绝缘内部水分分布状态。其中,峰频与交叉点频率对区分均匀受

潮和不均匀受潮尤为敏感,可作为后续建立油纸绝缘受潮状态识别模型的重要特征参数。

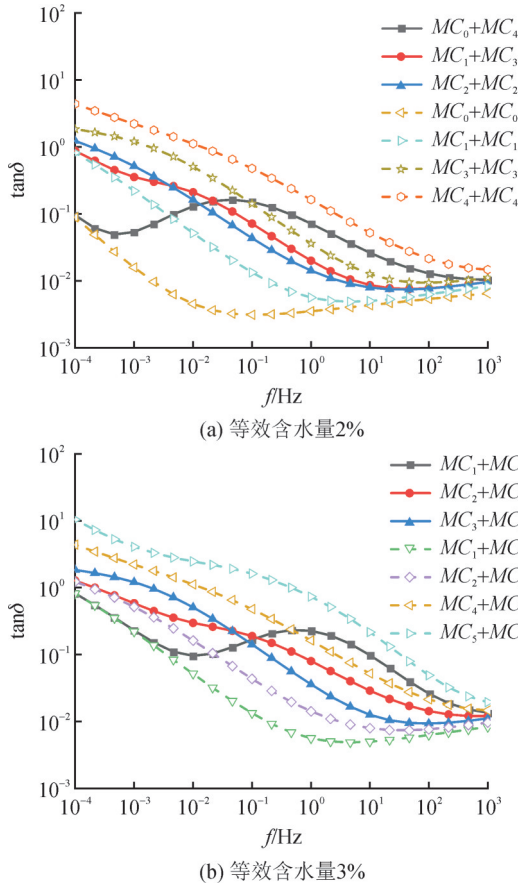


图5 双单元组合模型的频域介电特征曲线

Fig. 5 Dielectric response characteristics of the dual-unit stratified moisture model

2 套管模型FDS测试与仿真分析

为验证实验室内油纸复合绝缘在不均匀受潮模型下的介电响应特性,同时研究实际结构更为复杂的套管不均匀受潮介电响应特征,文中首先对多单元油纸叠层模型进行实验分析,之后主要研究套管末屏局部受潮及套管均匀、不均匀受潮模型,通过设定调节含水量参数,获取含水量对套管模型介电响应特征的影响规律。

2.1 多单元叠层不均匀受潮模型

考虑到不均匀受潮的情况多样性,以及现场油浸式套管的等效含水量一般小于2%,当油浸式套管含水量评估结果显示超过2%时,可能考虑对其进行退役更换处理,因此针对十单元叠层等效含水量为1%的组合情况进行了详细分析,各纵向组合方式见表2。进行频域介电谱测试时,高电压电极极板作为外侧,测量极板作为内侧,水分较低的介质一侧与高压电极极板贴合,组合模型置于真空干燥箱24 h

后开始测试,箱内温度设置为70℃,测试电压峰值为200 V, FDS测试结果见图6。

表2 等效含水量1%纵向组合方式

Table 2 Longitudinal combination patterns with an equivalent moisture content of 1%

名称	组合方式
分布1	0%+0%+0%+0%+1%+1%+1%+1%+1%+5%
分布2	0%+0%+0%+0%+1%+1%+1%+1%+3%+3%
分布3	0%+0%+0%+0%+1%+1%+1%+1%+2%+4%
分布4	0%+1%+1%+1%+1%+1%+1%+1%+1%+2%
分布5	0%+0%+1%+1%+1%+1%+1%+1%+2%+2%

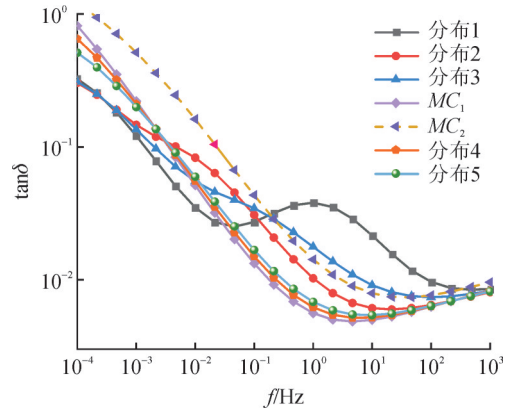


图6 等效含水量1%不同竖向组合模型FDS曲线

Fig. 6 FDS curves of different vertical combination models with an equivalent moisture content of 1%

从结果可以看出,分布1、分布2和分布3模型对应最外侧的两单元叠层受潮的情况,当最外侧含水量较高时,组合模型的 $\tan\delta$ - f 曲线起伏波动较大,在频率1 Hz附近出现不均匀受潮时的特征损耗峰,相比于另外两种水分分布,损耗峰现象更明显,峰值频率更高,峰值较低。因为电介质极化损耗的建立时间缩短导致介损曲线的损耗峰频率向更高频率下移动。排除分布1,其他组合形式下的 $\tan\delta$ - f 曲线幅值起伏波动大大降低。随着多单元叠层模型中纸样含水分布差异的增强,不均匀受潮状态下的曲线相对于均匀受潮曲线的偏离程度逐渐增大,表现为在特征频段内的起伏更加显著。同时,两类曲线的交叉位置持续向高频方向移动,表明含水分布越不平衡,界面极化效应越突出,其影响范围也扩展至更高频段。

2.2 套管末屏局部受潮模型

考虑到套管末屏局部受潮结构复杂,在实验室中难以构建含水分布可控且重复性良好的实体试样,因此文中采用Comsol对其介电响应进行数值模拟。基于前述研究已验证的FDS建模方法,建立了一个套管末屏局部受潮参数化等效模型,其几何结构见图7(a),对称轴与高压导体的电极极板中心线

重合,从而在保证计算精度的同时有效降低求解规模。在该模型中,参数 Y 表示绝缘结构的叠层单元数,对应实际套管中的电容屏层数;除末屏局部区域外,其余各层含水量统一设定为 MC_0 。参数 X 用于描述末屏受潮区域所占比例,其定义为受潮区域体积与该层油纸绝缘区域总体积之比,取值越大表示局部受潮范围越广。末屏受潮区域的含水量可根据分析需求单独调整,以模拟不同程度的局部受潮缺陷。各组水分分布组合及其对应参数设置见表3。

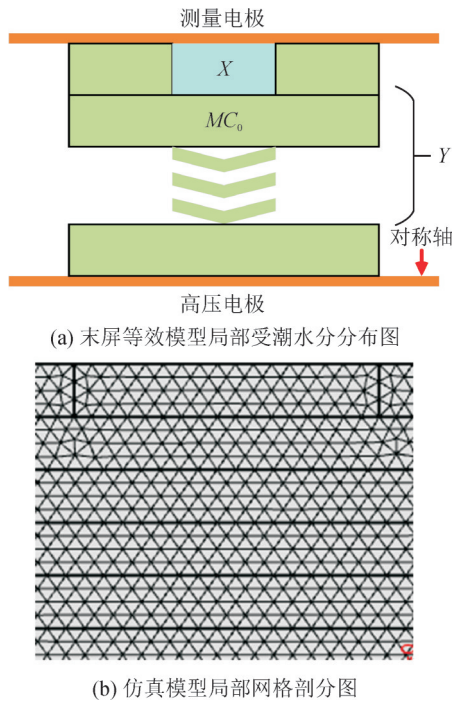


图7 套管末屏局部受潮模型

Fig. 7 Schematic diagram of localized moisture distribution in the end screen

表3 末屏局部受潮水分组合($Y=10, X=1/3$)

Table 3 Moisture combinations for localized moisture ingress at the end screen ($Y=10, X=1/3$)

组合形式	X 部位含水量
分布1	MC_1
分布2	MC_2
分布3	MC_3
分布4	MC_4
分布5	MC_5

10层电容屏结构下末屏局部受潮模型的FDS仿真结果见图8。其中,仅末屏区域存在非均匀含水量分布,其余各层的含水量均保持为 MC_0 。参数 X 所对应的局部区域设置为受潮区,其含水量依次由 MC_1 增加至 MC_5 ,用于模拟不同严重程度的末屏受潮缺陷。从仿真结果可以看出,随着末屏局部含水量不断升高,曲线整体水平逐步提高,且在中高频范围内出现更加明显的隆起特征,最终形成清晰

的介质损耗峰。这说明局部受潮增强了末屏区域与周围绝缘之间的电导率和介电常数差异,使界面极化作用显著增强。进一步观察可发现,随着受潮程度加剧,曲线在低频区域的介损值并未同步大幅上升,反而整体略有下降,并逐渐接近低含水量均匀受潮模型的响应特征;而在较高频段,曲线则明显向高含水量均匀受潮曲线靠拢。这种低频靠近低水分,高频趋近高水分的分段特征反映出局部受潮对不同频段的影响机制存在差异。因此,末屏局部受潮不仅会提高介质损耗水平,还会改变 $\tan\delta-f$ 曲线的形状及特征频率,损耗峰的位置、峰值大小以及不同频段的变化趋势均可作为识别套管末屏局部受潮程度的重要诊断指标。

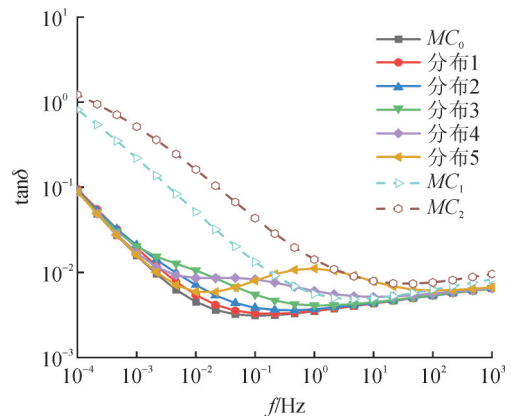


图8 不同受潮程度下 $\tan\delta-f$ 仿真结果图

Fig. 8 Simulated $\tan\delta-f$ curves under different moisture severity levels

在参数 X 为0.3且含水量固定为 MC_5 条件下,对不同叠层数的频域介电特性进行仿真,结果见图9。从图9可以看出,在局部受潮范围和受潮程度保持不变时,各组曲线总体形态基本一致,均保留了由局部受潮引起的损耗峰特征,但随着叠层数增加,曲线整体逐渐下移,介质损耗水平降低,同时损耗峰对应的特征频率向高频方向偏移。进一步分析发现,当叠层数量由较少逐步增加时,介损幅值下降较为明显;而在叠层数继续增大后,曲线变化幅度逐渐减弱,说明系统响应趋于稳定。这表明随着未受潮层数增多,局部高含水区域在整个绝缘结构中的占比不断减小,其对总损耗的贡献相对降低。

从水分分布均匀性来看,叠层数增加意味着局部受潮区域在整体结构中的权重下降,系统的等效不均匀度随之减小。当 Y 足够大时,局部异常对整体响应的扰动趋于有限, $\tan\delta-f$ 曲线将逐渐接近均匀受潮模型的特征,损耗峰也会明显减弱甚至消失。因此,随着绝缘层数不断增加,局部受潮所产生的界面极化效应被整体结构平均化,最终表现出更加

接近均匀介质的频域响应。

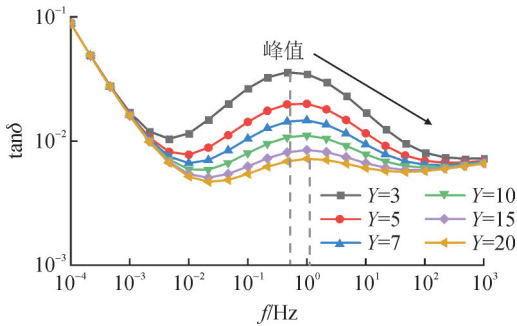


图9 不同 Y 下的 $\tan\delta$ - f 仿真结果图

Fig. 9 Simulated $\tan\delta$ - f curves under different values of Y

基于套管末屏局部受潮模型的仿真结果可以看出,频域介电谱特征主要受绝缘结构的轴向厚度和末屏局部区域的实际含水量的影响。相比之下,受潮区域在末屏中的横向占比变化对整体 $\tan\delta$ - f 曲线的影响相对有限,仅在局部频段引起幅值上的细微调整,而不会改变主要特征参数的演化规律。这一结果表明,在套管整体绝缘系统中,介电响应对水分含量和纵向分布更为敏感,而对同一层内的横向分布范围敏感度较低。因此,在后续建模与实验分析中,可重点关注绝缘厚度及局部含水量对介电响应的影响,并适当简化受潮区域尺寸的描述,以降低模型复杂度和计算量,同时保持较好的分析精度。

2.3 均匀与不均匀受潮套管模型

经询问套管生产厂家、查阅资料,获得了110 kV油浸式套管的尺寸信息,该套管采用等台阶、等电容的设计,套管各极板的尺寸信息见表4。根据CAD模型在Comsol软件中设置好绝缘纸、导杆、绝缘油、铝箔等各项材料的参数后,对套管模型进行网格剖分,局部剖分网格图见图10。网格剖分完毕后需要设定初值及边界条件,边界条件包括高电位、零电位、均压电位设定。

1)高电位设定:高电位区域包括导电杆、均压环、将军帽套等,电压与频域介电谱测试值相同,正弦交流电压,峰值为200 V。

2)零电位设定:零电位区域包括末屏、法兰、末屏引线、大地等,同时需要在套管外一定范围内的空气作为无限远边界,该边界电位同为零。

3)均压电位设定:为保证电容心子内轴向电场的均匀性,需将内部除导杆和末屏外其余的铝箔边界设定为悬浮电位。

均匀受潮模型中,套管内电容屏内部的含水量分别为 MC_0 - MC_5 ;不均匀受潮模型中,研究了末屏受潮时的介电响应特性,设定套管末屏含水量范围为 MC_0 - MC_5 ,其余电容屏含水量均匀为 MC_0 ,测试结果

表4 110 kV油纸套管各极板尺寸

Table 4 Dimensions of electrode plates for the 110 kV oil-paper bushing

极板序号	上台阶 λ_i /mm	下台阶 λ_j /mm	极板长度 l_i /mm	极板半径 r_i /mm	绝缘厚度 d_i /mm
0	28	13	1 672	23.23	—
1	28	13	1 632	24.42	1.19
2	28	13	1 593	25.64	1.22
3	28	13	1 553	26.90	1.25
4	28	13	1 514	28.18	1.28
5	28	13	1 475	29.48	1.30

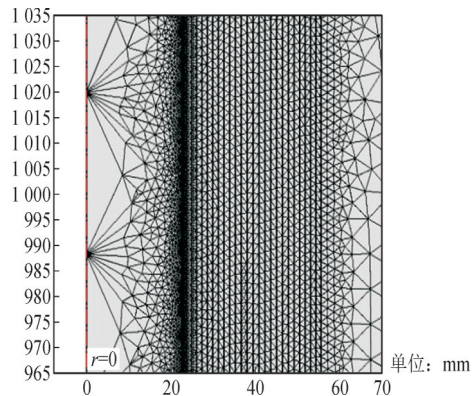


图10 套管仿真模型局部剖分图

Fig. 10 Local cross-sectional view of the bushing simulation model

见图11。图11(a)表明当套管模型均匀受潮时, $\tan\delta$ - f 曲线与实验室内的简化油纸绝缘模型略有不同,但整体曲线特征高度相似。随着含水量的升高, $\tan\delta$ - f 曲线整体增加,含水量较低时,套管模型的 $\tan\delta$ - f 曲线随频率的升高先减小后增大,含水量较高时, $\tan\delta$ - f 曲线随频率的升高呈下降趋势。由图11(b)可见,套管末屏含水量不同时, $\tan\delta$ - f 曲线特征差异显著。随着局部含水量增加,曲线出现明显损耗峰,且峰值频率向高频迁移,这与末屏局部受潮模型的规律一致。该套管含20层电容屏,但任一屏局部含水量偏高就可使 $\tan\delta$ - f 特征明显偏离均匀受潮情况,侧面验证了应用频域介电谱诊断套管非均匀受潮的可行性。

3 结论

针对油纸绝缘套管不均匀受潮特性的研究,文中提出了一种基于有限元分析的仿真与实验相结合的方法。该方法采用Comsol Multiphysics建立了油纸绝缘及套管末屏局部受潮的数值模型,同时在实验室内构建了不均匀受潮实物模型,通过仿真与实验对比分析,得出以下结论:

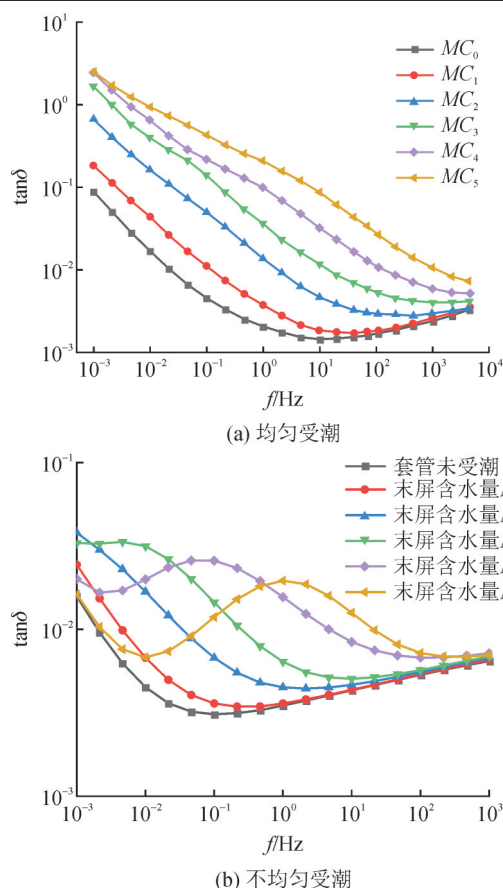


图11 110 kV套管模型均匀受潮与不均匀受潮FDS仿真结果

Fig. 11 FDS simulation results of uniformly and non-uniformly moistened 110 kV bushing model

1)水分影响油纸绝缘FDS特性曲线整个频段。水分均匀时,随着水分含量的增加,介损在各频段内的幅值增大,水分对复电容和复介电常数虚部影响大于实部;油纸绝缘模型中叠层数量的变化对频域介电谱特征的作用较弱。

2)仿真模型和实物模型的FDS测试均表明,油纸绝缘在含水分布不均时, $\tan\delta$ - f 曲线会出现明显的损耗峰及起伏特征。随着受潮不均匀程度增加,曲线波动增强,损耗峰对应频率增加,峰值幅值降低,与等效含水量相同的均匀受潮曲线的交点频率增大;随着水分分布不均匀度的增大,交点左侧曲线介损幅值降低,交点右侧介损幅值增加。损耗峰频率、峰值幅值及交点频率可作为判断油纸绝缘水分分布不均匀程度的特征参数。

3)基于有限元方法建立了套管均匀与不均匀受潮模型,结果表明频域介电响应对末屏局部含水量及绝缘厚度变化较为敏感。末屏局部受潮含水量增大时, $\tan\delta$ - f 曲线幅值增大,损耗峰向高频方向移

动;绝缘厚度变化会影响整体介损幅值及曲线形态,而同层横向水分分布差异对整体测试结果影响相对有限,可在建模中适当简化。

参考文献:

- [1] 中国电力企业联合会.中国电力行业年度发展报告2024[R].2024-07-10.
China Electricity Council. China electric power industry annual development report 2024[R].2024-07-10.
- [2] 王江元,李 驰,梁昌波,等.新型电力系统多目标随机优化调度模型和算法[J]. 电网与清洁能源,2025,41(3):1-9.
Wang Jiangyuan, Li Chi, Liang Changbo, et al. A multi-objective stochastic optimal dispatching model and algorithm for novel power systems[J]. Power System and Clean Energy, 2025, 41(3): 1-9.
- [3] 翟绘景,高梓淳,李文静,等. 计及网损和相关性的新型电力系统概率碳排放流计算[J]. 供用电,2024,41(7):84-91.
Zhai Huijing, Gao Zichun, Li Wenjing, et al. Calculation of probabilistic carbon emission flow in a new power system considering network losses and correlation[J]. Distribution & Utilization, 2024, 41(7): 84-91.
- [4] 管 霖,陈鑑凯,陈灏颖,等.考虑新能源随机性的新型电力系统图深度学习稳定指标概率分布评估模型[J]. 南方电网技术, 2024,18(7):118-128.
Guan Lin, Chen Liukai, Chen Haoying, et al. Graph deep learning based stability index probability distribution assessment method of new power system considering the stochastic output of renewable energy[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(7): 118-128.
- [5] 白云鹏,张志艳,许 才,等. 基于多头注意力机制改进图神经网络的新能源电力系统风险评估[J]. 电力建设,2025,46(1):147-157.
Bai Yunpeng, Zhang Zhiyan, Xu Cai, et al. Risk assessment of renewable energy power systems via graph multi-attention networks [J]. Electric Power Construction, 2025, 46(1): 147-157.
- [6] 黄定威,王 锋,李 波. 面向新型电力系统的含风光储配电网多目标调度方法[J]. 电测与仪表,2025,62(3): 38-45.
Huang Dingwei, Wang Feng, Li Bo. A multi-objective scheduling method for wind and solar energy storage and distribution network facing novel power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2025, 62(3): 38-45.
- [7] 施 涛,许泽炎,雷震亚,等.计及一致性的多点新能源发电制氢协同控制策略研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 26-36.
Shi Tao, Xu Zeyan, Lei Zhenya, et al. Study on cooperative control strategy of multi-point new energy power generation and hydrogen production considering consistency[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 26-36.
- [8] 王 进,袁曼曼,石存金,等. 极端热环境下套管硅油纸绝缘特性与击穿特性对比研究[J]. 变压器, 2025, 62(7): 51-60.
Wang Jin, Yuan Manman, Shi Cunjin, et al. Comparative study on physicochemical and breakdown characteristics of silicone oil-pa-

- per insulation under extreme thermal environment [J]. Transformer, 2025, 62(7): 51-60.
- [9] 王欣, 施勇, 邹德旭, 等. 550 kV 油浸纸套管缺陷仿真分析[J]. 电瓷避雷器, 2025(1): 118-126.
- Wang Xin, Shi Yong, Zou Dexu, et al. Simulation analysis of defects in 550 kV oil transformer bushing[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(1): 118-126.
- [10] 孙希盈, 张宏滨, 申鹏飞, 等. 一起 220 kV 变压器高压套管漏油事故分析[J]. 变压器, 2025, 62(8): 64-68.
- Sun Xiyang, Zhang Hongbin, Shen Pengfei, et al. Analysis of 220 kV transformer high-voltage bushing oil leak accident[J]. Transformer, 2025, 62(8): 64-68.
- [11] 刘杉, 高冲, 侯俊义, 等. 基于去离子水冷却 ± 800 kV 换流变压器阀侧套管的冷却效果和参数的影响[J]. 电工技术学报, 2024, 39(12): 3884-3894.
- Liu Shan, Gao Chong, Hou Junyi, et al. Cooling effect and effect of parameters of the deionized water cooling based ERIP type bushing of ± 800 kV converter transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(12): 3884-3894.
- [12] 吴广宁, 史志鹏, 林牧, 等. 特高压直流套管电热特性及电接触系统失效机理研究综述[J]. 高电压技术, 2025, 51(8): 4130-4145.
- Wu Guangning, Shi Zhipeng, Lin Mu, et al. Research review on electro-thermal coupling properties and failure mechanisms of electrical contact systems in ultra-high voltage DC bushings[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(8): 4130-4145.
- [13] 段成, 李丰, 杨嘉伟, 等. 一起 110 kV 变压器高压套管故障原因分析[J]. 变压器, 2024, 61(8): 58-61.
- Duan Cheng, Li Feng, Yang Jiawei, et al. Cause analysis of failure of high-voltage bushing of 110 kV transformer[J]. Transformer, 2024, 61(8): 58-61.
- [14] Su Zhicheng, Zhang Yiyi, Du Yongyong, et al. Two models for predicting frequency-domain spectroscopy of nonuniformly damped OIP bushings based on FEM and dielectric theory[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024(73): 1-10.
- [15] 裴立铭, 李婷. 电网事故分析及处理[J]. 民营科技, 2014(11): 36.
- Pei Liming, Li Ting. Analysis and handling of power grid accidents [J]. Non-State Running Science & Technology Enterprises, 2014(11): 36.
- [16] 张璐, 杨昊, 赵恒, 等. 高压套管油纸绝缘气泡生成特性[J]. 西安工程大学学报, 2020, 34(4): 64-71.
- Zhang Lu, Yang Hao, Zhao Heng, et al. The generation characteristics of oil-paper insulation bubble in high-voltage bushing[J]. Journal of Xi'an Polytechnic University, 2020, 34(4): 64-71.
- [17] 杨昊, 胡文秀, 张璐, 等. 基于 ADASYN 数据平衡化的 PSO-BPNN 变压器套管故障诊断[J]. 电力工程技术, 2024, 43(2): 170-178.
- Yang Hao, Hu Wenxiu, Zhang Lu, et al. Fault diagnosis of transformer oil-paper bushings in PSO-BPNN algorithm based on ADASYN data balancing[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(2): 170-178.
- [18] 杨定乾, 袁曼曼, 杜嘉宝. 基于油液压力感知的油浸纸绝缘套管缺陷辨识方法研究[J]. 变压器, 2025, 62(9): 1-10.
- Yang Dingqian, Yuan Manman, Du Jiabao. Research on defect identification method of oil-impregnated paper insulation bushing based on oil pressure sensing[J]. Transformer, 2025, 62(9): 1-10.
- [19] 张磊, 赵坚, 黎大健. 广西电网 110 kV 及以上变压器套管运行缺陷分析[J]. 广西电力, 2013, 36(3): 67-69.
- Zhang Lei, Zhao Jian, Li Dajian. Analysis of bushing operation defect of 110 kV and above voltage level transformer in Guangxi power grid[J]. Guangxi Electric Power, 2013, 36(3): 67-69.
- [20] 白斌. 油纸套管绝缘介质老化诊断分析[J]. 四川电力技术, 2009, 32(3): 82-85.
- Bai Bin. Diagnosis and analysis of insulating medium ageing of oiled paper bushing[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2009, 32(3): 82-85.
- [21] 刘泰蔚, 谢雄杰, 罗晓庆, 等. 基于电热耦合的油纸绝缘套管内部压强变化特性[J]. 高电压技术, 2024, 50(8): 3636-3643.
- Liu Taiwei, Xie Xiongjie, Luo Xiaoqing, et al. Internal pressure change characteristics of oil-impregnated paper bushing based on electro-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(8): 3636-3643.
- [22] 陈晋鹏, 杨昊, 张璐, 等. 环境温度变化对含局部过热缺陷的油纸套管温升特性影响研究[J]. 电瓷避雷器, 2024(3): 131-139.
- Chen Jinpeng, Yang Hao, Zhang Lu, et al. Impact of ambient temperature changes on temperature rise characteristics of oil bushings with local overheating defects[J]. Insulators and Surge Arresters, 2024(3): 131-139.
- [23] 张润, 邱志斌, 童志鹏, 等. 基于红外图像目标检测与偏斜矫正的变压器套管发热缺陷检测方法[J]. 南方电网技术, 2024, 18(9): 59-68.
- Zhang Run, Qiu Zhibin, Tong Zhipeng, et al. Detection method of transformer bushing thermal defect based on infrared image target detection and skew correction[J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(9): 59-68.
- [24] 杨帆, 张玉琛, 王鹏博, 等. 电容屏破损缺陷局部放电过程规律特征及仿真分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(9): 2860-2872.
- Yang Fan, Zhang Yuchen, Wang Pengbo, et al. Characteristics and simulation analysis of partial discharge process of condenser foil layer defect[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(9): 2860-2872.
- [25] DL/T 596—2021 电力设备预防性试验规程[S].
- DL/T 596—2021 Preventive test code for electric power equipment[S].
- [26] Zhang G, Tian W, Zhang D. Moisture and aging identification of oil-paper insulated bushing based on frequency domain spectroscopy [C]//2024 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Applications (ICHVE), 2024: 1-4.
- [27] 董明, 刘媛, 任明, 等. 油纸绝缘频域介电谱解释方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 1002-1008.
- Dong Ming, Liu Yuan, Ren Ming, et al. Explanation study of

- frequency-domain dielectric spectroscopy for oil-paper insulation system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 1002-1008.
- [28] Bétié A, Meghnefi F, Fofana I, et al. On the impacts of ageing and moisture on dielectric response of oil impregnated paper insulation systems[C]//2012 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2012: 219-222.
- [29] Shayegani A A, Mohseni H, Borsi H, et al. Diagnostics of power transformers with dielectric response measurements[C]//IEEE International Power System Conference, 2005: 1-8.
- [30] Lundgaard L E, Linhjell D, Hestad O L, et al. High frequency dielectric response of paper/oil insulation[C]//2008 IEEE International Conference on Dielectric Liquids, 2008: 1-4.
- [31] Zaengl W S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. theoretical considerations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(5): 5-19.
- [32] 杨丽君, 齐超亮, 吕彦冬, 等. 变压器油纸绝缘状态的频域介电谱特征参量及评估方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 212-219.
- Yang Lijun, Qi Chaoliang, Lyu Yandong, et al. Characteristic parameters and assessment methods of frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 212-219.
- [33] Su Zhicheng, Zhang Yiyi, Du Yongyong, et al. An enhanced X model of oil-impregnated paper bushings including axial and radial nonuniform thermal aging[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(2): 825-833.
- [34] 吕 玮, 吴广宁, 周利军, 等. 采用介电频谱法分析评估油纸绝缘的微水质量分数[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 3015-3020.
- Lyu Wei, Wu Guangning, Zhou Lijun, et al. Analysis on moisture in oil-paper insulation using frequency domain spectroscopy[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 3015-3020.
- [35] Allan D M, Blundell M S, Boyd K J, et al. New insulation diagnostic and monitoring techniques for in-service HV apparatus[C]//3rd International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials, 1991: 448-451.
- [36] 杨定乾, 王 进, 宋 通, 等. 基于频域介电响应的油浸纸套管受潮缺陷诊断分析[J]. 高压电器, 2022, 58(6): 77-86.
- Yang Dingqian, Wang Jin, Song Tong, et al. Diagnosis and analysis of moisture defect of oil-paper insulated bushing based on frequency domain dielectric response[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 77-86.
- [37] Ansari H T, Vahedi A, Mahmoudi N. Evaluating the insulation condition of oil-impregnated paper bushings based on the time constant database[J]. IET Electric Power Applications, 2024(18): 1233-1243.
- [38] 彭 誉, 杨丽君, 李佳俊, 等. 基于介质损耗谱结构不敏感频率点的油纸绝缘受潮状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(23): 7737-7750.
- Peng Yu, Yang Lijun, Li Jiajun, et al. Evaluation method of oil-paper insulation damp state based on the structure-insensitive frequency point of loss spectrum[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(23): 7737-7750.
- [39] 李先浪. 基于电介质响应法的油纸绝缘微水扩散特性研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- Li Xianlang. Study on moisture diffusion characteristics of oil-paper insulation based on dielectric response method[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [40] 刘 媛, 董 明, 任 明, 等. 油纸绝缘介电响应函数模型参数与频域介电谱相关性仿真研究[J]. 变压器, 2015, 52(10): 26-32.
- Liu Yuan, Dong Ming, Ren Ming, et al. Simulation research on correlation between parameters of dielectric response function model and frequency domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation system[J]. Transformer, 2015, 52(10): 26-32.
- 姜炯挺(1985—), 男, 本科, 高级工程师, 长期从事高电压试验和故障诊断工作(E-mail: 13567498943@126.com)。
- 张大宁(1989—), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为电力设备运行状态检测以及材料改性研究等(通信作者)(E-mail: daningzhang@xjtu.edu.cn)。