

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.02.020

# 基于频域介电谱的油纸绝缘套管局部受潮诊断研究

陈晓琳<sup>1,2</sup>, 符小桃<sup>1,2</sup>, 吴乾东<sup>1,2</sup>, 赵浩翔<sup>3</sup>, 李元<sup>3</sup>, 穆海宝<sup>3</sup>

(1. 海南电网有限责任公司电力科学研究院, 海南 海口 570311;

2. 海南省电网理化分析重点实验室, 海南 海口 570311;

3. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049)

**摘要:**套管受潮初期多为局部受潮,因此局部受潮的有效诊断可避免套管受潮过程的进一步发展。文中采用频域介电谱(FDS)对套管局部受潮诊断方法进行研究。首先制备梯度含水量油纸绝缘样品,组合形成局部受潮等效试样,并获得其FDS特性。结果表明,局部受潮会形成不同含水量油纸绝缘界面,在FDS曲线中产生界面松弛极化损耗峰,径向局部受潮程度越大,损耗峰幅值越大,并向高频方向移动,因此基于界面松弛极化损耗峰特性可对套管局部受潮进行诊断。利用变压器套管仿真模型验证了文中所提方法的有效性,为变压器套管早期故障预警与诊断提供了新方法。

**关键词:**油纸绝缘;高压套管;局部受潮;频域介电谱(FDS);界面松弛极化;故障诊断

**中图分类号:**TM732

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)02-0149-07

## 0 引言

油纸绝缘套管是电力系统中的关键附属设备。近年来由变压器套管故障引发的电力事故频发,影响恶劣<sup>[1-3]</sup>。水分入侵是套管故障的主要原因之一。套管外部密封不严会使得水分侵入,导致套管受潮,例如套管末屏接地外壳由于运维过程中的反复开合,水分入侵几率大大增加<sup>[4]</sup>。此外,盐的污染会引起套管法兰和管件的异常腐蚀,导致密封恶化,进而导致大气中的水分进入,使得套管的绝缘状况日益劣化<sup>[5]</sup>。

油纸绝缘中绝大部分的水分子与绝缘纸纤维素链的羟基形成氢键,稳定吸附于绝缘纸中<sup>[6-7]</sup>,而绝缘油具有较强的疏水性,进一步阻隔了水分在绝缘纸层间的扩散<sup>[8-9]</sup>,因此套管受潮初期多为局部受潮状态。套管是电力系统中唯一同时具备绝缘作用和支撑连接作用的电力设备,其承担的电力、热应力和机械应力非常复杂<sup>[10-11]</sup>。受潮导致油纸绝缘电导率增加,因此,复杂应力下局部受潮可能进一步引发局部过热、局部放电等故障,加速套管劣化过程。同时,水分入侵为不可逆过程,若无法在受潮初期作出有效的局部受潮诊断并及时解决密封缺陷问题,随着受潮程度的不断加深,最终有可能造成爆炸、火灾等严重事故<sup>[12-13]</sup>。

局部受潮属于受潮初期状态,油纸绝缘整体含水量较低,缺陷特征不明显,存在诊断难度。油色

谱对油中微水的检测结果准确度较高,但水分主要集中在绝缘纸中,油中微水无法有效反映绝缘纸中的含水量;介损、电容量等检测参量影响因素较多,且仅能反映整体含水量的变化,对局部受潮等集中性缺陷灵敏度较差。综上所述,常规检测方法无法对局部受潮及时有效地作出诊断<sup>[14-15]</sup>。

频域介电谱(frequency domain spectroscopy, FDS)是一种基于介电响应理论的频谱测试方法,该方法包含信息丰富,可对介电绝缘状态进行深入分析<sup>[16-19]</sup>,具备诊断油纸绝缘局部受潮状况的潜力。文献[20-21]从微观层面深入探究了水分对介电过程的影响以及整体受潮状态的评估。文献[22]从相对宏观的电路模型出发,实现了基于扩展德拜模型油纸绝缘整体受潮状态的定量评估,建立了FDS与电路模型之间的联系。受潮会导致油纸绝缘电导率、介电常数等参量发生变化<sup>[23]</sup>,而局部受潮会引起等效电路的对应变化,最终导致FDS曲线出现新的特性,这些特性可以作为油纸绝缘局部受潮诊断评估的重要依据,但相关研究鲜有报道。

文中以油纸绝缘套管局部受潮诊断为目标,探究了不同类型局部受潮的FDS特性,基于界面松弛极化模型对其进行深入分析,提出变压器油纸绝缘套管径向局部受潮诊断方法。利用变压器套管仿真模型对该方法的有效性进行验证,为变压器套管受潮初期的及时有效预警与诊断提供解决方案。

## 1 实验设计

在变压器油纸绝缘套管实际运行中,局部受潮

收稿日期:2021-10-23;修回日期:2021-12-27

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52107165)

程度、类型不同,对损耗峰幅值、频率造成重要影响。为实现套管局部受潮有效诊断,在实验室制备不同的局部受潮等效试样,以对局部受潮油纸绝缘 FDS 特性进行全面探究。

### 1.1 均匀含水量油纸绝缘样品制备

文中在实验室环境下制备梯度含水量的油纸绝缘样品,其过程主要包括烘箱干燥、真空环境浸油、精确加湿等。

裁剪后的绝缘纸厚 1.04 mm,长 600 mm,宽 100 mm,在温度 90 ℃,压强 100 Pa 的烘箱中持续干燥 48 h。以同样的环境设置对 25 号克拉玛依变压器油持续干燥 48 h。干燥后将绝缘纸取出并均匀暴露于空气之中吸潮,利用高精度天平称重法控制绝缘纸叠含水量,增加每次吸潮的绝缘纸数量以减小称重时的测量误差。将吸潮后的绝缘纸放入干燥好的油中静置 48 h,以达到每种含水量绝缘纸中水分分布的平衡。

对制备好的油纸绝缘样品随机取样进行卡尔费休滴定,实际含水量为:0.53%,1.08%,2.01%,3.09%,4.11%,5.12%,形成梯度含水量样品,近似用 MC0、MC1、MC2、MC3、MC4、MC5 表示。

### 1.2 局部受潮等效试样制备

变压器套管内部绝缘纸芯子结构相对简单,为绝缘纸以同心圆柱的形式层层包裹构成。因此当水分从不同位置侵入套管后,水分在内芯子的扩散方向包括轴向和径向 2 个方向,从而形成不同的局部受潮情况。为还原局部受潮时产生的不同含水量油纸绝缘界面,在实验室制作了局部受潮等效试样。

当受潮方向为径向时,实验室等效试样如图 1 所示。根据油纸绝缘层数分为局部受潮双层界面和局部受潮三层界面。进行不同含水量组合,以模拟套管不同程度的局部受潮情况。组合中水分含量差值越大,则局部受潮程度越大。

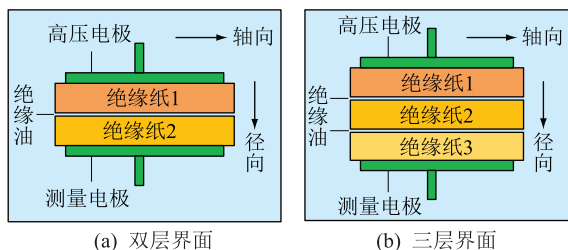


图 1 径向局部受潮等效试样

Fig.1 Equivalent sample of radial partial damp

当受潮方向为轴向时,为凸显轴向局部受潮特性,制备轴向局部受潮等效试样如图 2 所示,同样包含局部受潮双层界面和局部受潮三层界面。对不

同位置绝缘纸进行不同含水量组合,以模拟油纸绝缘套管不同程度的局部受潮情况。组合中 MC 差异越大,则局部受潮程度越大。

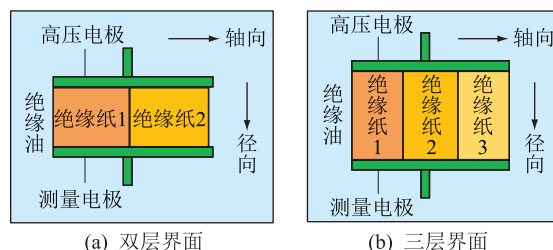


图 2 轴向局部受潮等效试样

Fig.2 Equivalent sample of axial partial damp

定义等效含水量为样品总含水量的平均值。例如,其双层界面等效试样,含水量为 MC0 和 MC2 的试样组合,其等效含水量近似为 MC1。

## 2 试验结果及分析

### 2.1 径向局部受潮 FDS 特性

不同程度、不同类型径向局部受潮等效试样的 FDS 曲线分别如图 3 和图 4 所示。图中实线为局部受潮 FDS 曲线,虚线为整体均匀受潮 FDS 曲线。当整体受潮时,FDS 曲线随水分含量升高在全频段内均匀上移。

当局部受潮方向为径向时,FDS 曲线出现了明显的界面松弛极化损耗峰。图 3 为双层界面局部受潮试样 FDS 特性。当等效含水量为 3%时,不同局部受潮程度组合较多且特征较为显著,因此以图 3(c)为例进行分析:局部受潮时,曲线低频段和高频段相对于整体受潮曲线的偏移方向不同,低频区域向下凹,高频区域向上凸,从而形成损耗峰;随着等效试样组合中水分含量差别变大,局部受潮程度增大,低频段和高频段的偏移愈加明显,导致形成的损耗峰向右移动。

径向局部受潮时,FDS 曲线出现了明显的区别于整体受潮时的特征。局部受潮结果在高频段向高水分整体受潮 FDS 曲线靠近,在低频段向低水分整体受潮曲线靠近。而整体受潮 FDS 曲线随含水量的增大在全频段均匀上移,因此径向局部受潮程度越大,FDS 曲线高频段与低频段差异越大,损耗峰越明显。

图 4 为三层界面局部受潮试样 FDS 特性,特征与双层试样基本一致。在三层界面试样中,中间层含水量更好地模拟了局部受潮的实际情况,表示更弱的局部受潮程度。但局部受潮所导致的曲线特征仍然存在,曲线凸起仍随局部受潮程度的增大而增大。同时局部受潮 FDS 曲线特性更多地取决于

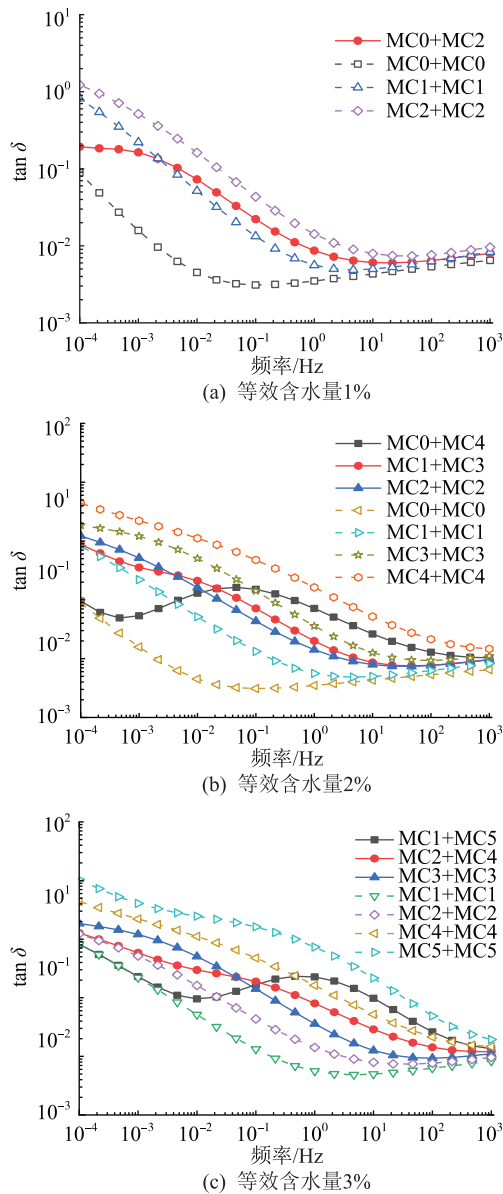


图3 径向局部受潮双层试样 FDS 特性

Fig.3 FDS characteristics of radial partial damp double-layer sample

组合中的最低含水量与最高含水量,而与组合里的中等含水量关系较小。

## 2.2 轴向局部受潮 FDS 特性

当局部受潮界面为轴向时, FDS 曲线特性如图 5 所示,组合中的低水分部分对 FDS 曲线影响较小,整体曲线特征偏向于高水分部分。轴向局部受潮时曲线特征与低水分组分关系较弱的原因可从阻抗的串、并联结构的差异理解,轴向组合时对应电介质并联模型,组合的总损耗电流为高水分与低水分油纸绝缘试样的和,因此轴向局部受潮时其 FDS 曲线特征受组合内较高水分介质的影响更大。轴向局部受潮三层试样与双层试样具有相似的 FDS 曲线特性,因篇幅限制不再展示。

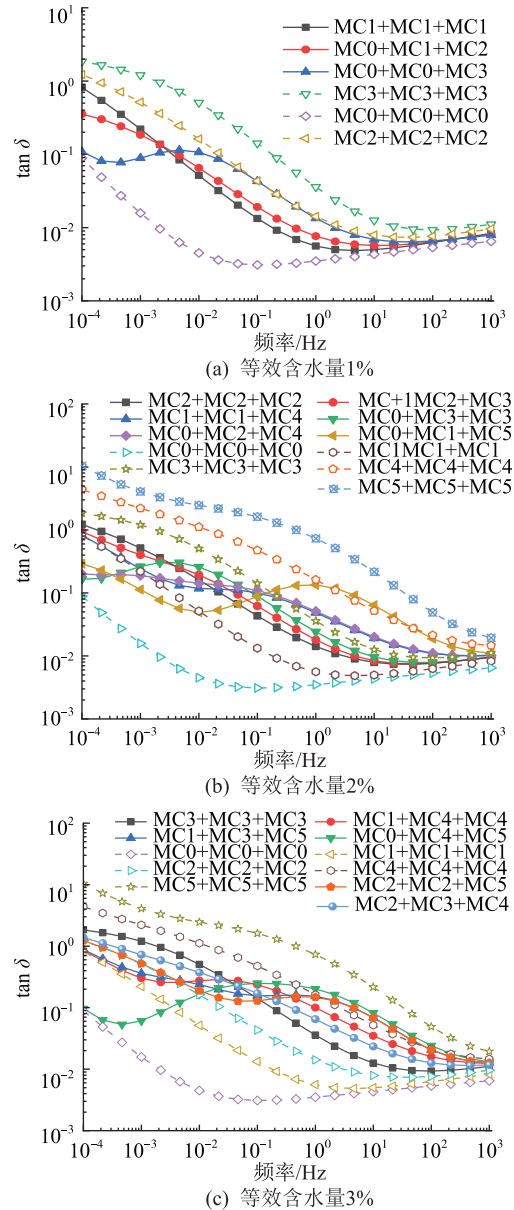


图4 径向局部受潮三层试样 FDS 特性

Fig.4 FDS characteristics of radial partial damp three-layer sample

对比轴向局部受潮与径向局部受潮结果,区别较为显著。轴向局部受潮结果与整体受潮时相似,曲线未出现显著的凸起。但观察可知,径向局部受潮时,曲线仍在高频段保持向高水分整体受潮曲线靠近的趋势,同时在低频段保持向低水分整体受潮曲线靠近的趋势。

## 2.3 径向局部受潮界面松弛极化特性分析

由于水分子与纤维素链羟基之间的氢键作用<sup>[6-7]</sup>,以及绝缘油的疏水作用<sup>[8-9]</sup>,水分很难在不同层间的绝缘纸之间扩散,导致套管受潮后沿径向形成不同水分含量绝缘纸界面。

套管径向局部受潮时,在电场作用下,电介质内部电荷移动方向垂直于界面,界面松弛极化效应

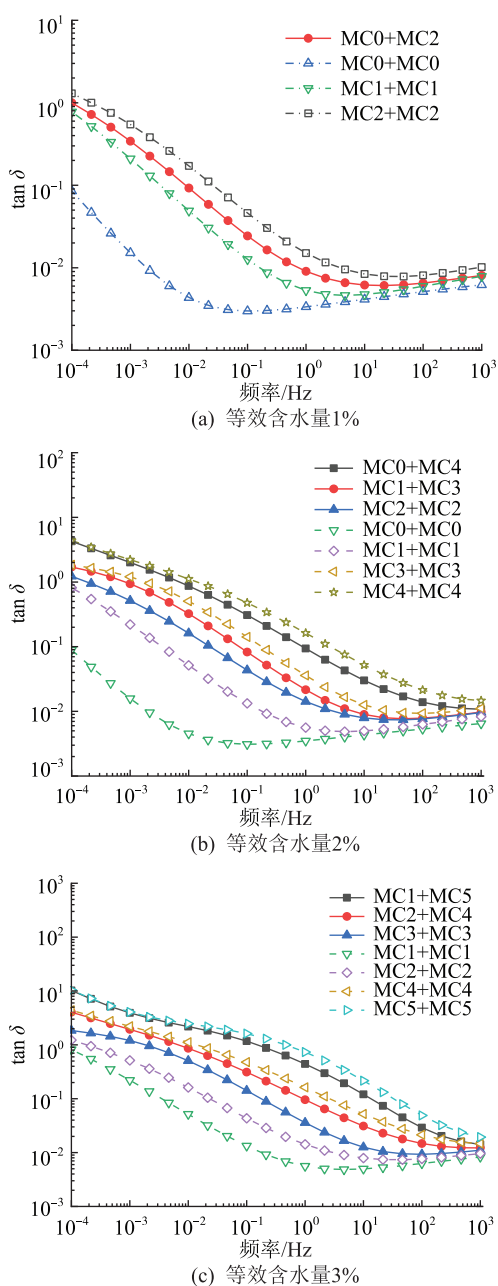


图5 轴向局部受潮双层试样 FDS 特性  
Fig.5 FDS characteristics of axial partial damp double-layer sample

较强,对应的 FDS 曲线中出现极化损耗峰。因此套管径向局部受潮时 FDS 曲线特性较为显著。

不同含水量样品形成的界面如图 6 所示。不同含水量油纸绝缘具有不同的介电常数  $\epsilon$  和电导率  $\gamma$ ,在等效电路中体现为不同的电容  $C_1, C_2$  和不同的电阻  $R_1, R_2$ 。

根据电路原理,界面松弛极化电流为:

$$i = \frac{U}{R_1 + R_2} + \frac{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)^2 (R_1 + R_2)} U e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (1)$$

为简化表达式,设:

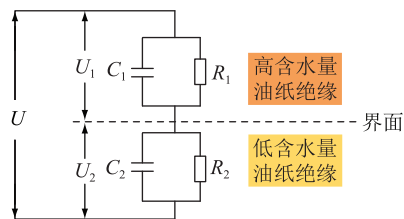


图6 不同含水量油纸绝缘界面  
Fig.6 Oil-paper insulations interface with different water content

$$m = \frac{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2}{R_1 R_2 (R_1 + R_2) (C_1 + C_2)} \quad (2)$$

进一步地,得到交流电场中的介电损耗角正切表达式:

$$\tan \delta = \frac{I_p}{I_Q} = \frac{1}{R_1 + R_2} + \frac{\omega^2 \tau^2 m}{1 + \omega^2 \tau^2} \quad (3)$$

$$\tau = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

式中: $I_p, I_Q$  分别为复电流的实部和虚部; $\omega$  为角频率; $\tau$  为界面松弛极化的时间常数。

因此,径向局部受潮时界面弛豫极化导致曲线中出现最大值凸起。局部受潮程度越严重,  $R_1, C_1$  和  $R_2, C_2$  差异越大,暂态响应越强烈,曲线凸起越显著。同时,损耗峰向右移动。

套管径向局部受潮与套管末屏受潮的实际受潮情况相符,且径向局部受潮时其 FDS 曲线中出现的损耗峰特性与局部受潮程度密切相关,基于此可对油纸绝缘套管局部受潮进行诊断。

### 3 套管局部受潮诊断分析与验证

#### 3.1 局部受潮套管仿真模型搭建

径向局部受潮等效试样的 FDS 曲线局部受潮特征明显,但是实验室所制备的试样为简化模型,尺寸远小于实际套管,由于实验条件限制,借助仿真方法建立 110 kV 变压器套管仿真模型,对其局部受潮特性进行研究,进一步验证基于界面松弛极化的套管局部受潮诊断方法的有效性。

参照某套管厂 110 kV 变压器套管结构,利用 COMSOL 仿真软件建立油纸绝缘套管仿真模型<sup>[24-25]</sup>。模型网格剖分如图 7 所示,完整网格包含 3 689 108 个域单元和 388 432 个边界元。

通过实验获得不同含水量油纸绝缘相对介电常数和电导率,对套管仿真模型不同部位进行不同的材料参数设置,以模拟套管不同局部受潮状况。图 8 为套管外侧局部受潮示意,设置了与实验等效



图7 110 kV 套管仿真模型剖分

Fig.7 Partition of 110 kV bushing simulation model

试样一致的不同水分含量油纸绝缘界面,如图中2处红色虚线所框部位所示。

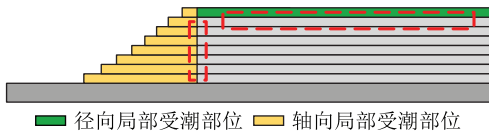


图8 套管外侧局部受潮

Fig.8 Outermost damp affected bushing

对中心导杆施加不同频率的交流电压激励,记录中心导杆流过的电流,计算得到套管模型在不同频率下的复阻抗,进一步转化即可得到套管模型局部受潮时的 FDS 曲线。三层界面局部受潮仿真与双层界面局部受潮仿真结果相似,因篇幅限制不再展示。

### 3.2 局部受潮套管 FDS 特性验证

改变套管轴向局部受潮含水量,以探究套管轴向局部受潮 FDS 特性,结果如图9所示。与整体受潮套管相比,轴向局部受潮时曲线并未出现损耗峰,仅在约  $10^{-2}$  Hz 处出现轻微增大。

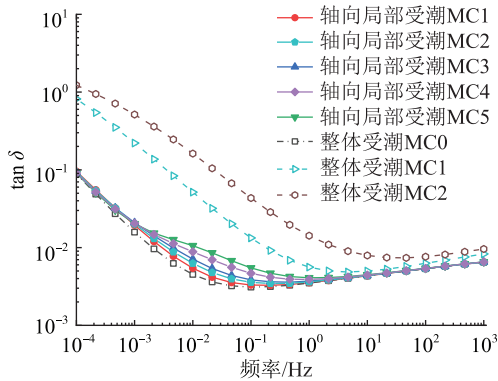


图9 套管外侧轴向局部受潮 FDS 曲线

Fig.9 FDS curves of outermost-layer-damped bushing along axial direction

实验室等效试样中局部受潮部位所占比例较大,因此局部受潮导致 FDS 曲线在整个测试频段均有增加,而套管模型中局部受潮部位所占比例较小,因此局部受潮导致的 FDS 曲线变化较小。但径向局部受潮不会导致 FDS 曲线出现损耗峰的特性是一致的。

改变套管径向局部受潮含水量,以探究套管径向局部受潮 FDS 特性,如图10所示。与整体受潮套管相比,尽管径向局部受潮部位仅为套管径向最

外侧绝缘纸,但损耗峰仍为径向局部受潮套管 FDS 曲线中极为重要的特征,根据损耗峰出现与否可对套管是否发生局部受潮进行判断。随着径向局部受潮程度增加,损耗峰幅值增加,同时向高频方向移动。径向局部受潮时,低频段接近未受潮曲线,而高频段接近高含水量曲线。根据局部受潮低频段、高频段 FDS 曲线与均匀含水量 FDS 曲线的拟合对比,可得到油纸绝缘套管局部受潮程度信息。

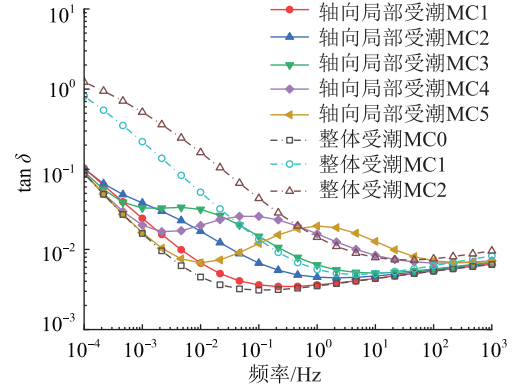


图10 套管外侧径向局部受潮 FDS 曲线

Fig.10 FDS curves of outermost-layer-damped bushing along radial direction

对于 110 kV 套管模型,径向最外层局部受潮后界面松弛极化损耗仍然非常显著,并对套管整体 FDS 产生重要影响,进一步验证了基于界面松弛极化的油纸绝缘套管径向局部受潮诊断方法的有效性。

## 4 结论

文中探究了不同类型局部受潮的 FDS 特性,利用界面松弛极化模型对径向局部受潮 FDS 特性进行深入分析,提出变压器油纸绝缘套管径向局部受潮诊断方法,弥补了套管受潮初期诊断方法的缺失,通过仿真研究验证了该方法的有效性,并得出以下结论:

(1) 径向局部受潮时,FDS 曲线出现明显凸起。径向局部受潮程度越严重,界面弛豫极化损耗越大,损耗峰越显著,并向高频方向移动;

(2) 不同水分含量油纸绝缘界面在交变电场下产生界面松弛极化损耗,其损耗峰的理论特性与实验特性相一致,因此可作为套管受潮初期的局部受潮状态诊断依据;

(3) 通过建立 110 kV 油纸绝缘变压器套管数值仿真模型,设置不同的局部受潮状况,进一步验证了文中局部受潮诊断方法在实际套管上应用的有效性,为变压器套管受潮初期的及时诊断提供了解决方案。

本文得到海南电网有限责任公司科技项目(073000KK52190005)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 徐龙,李丰,傅文渊.一起110 kV 变压器高压套管故障的解体分析[J]. 变压器,2015,52(2):72-73.  
XU Long, LI Feng, FU Wenyuan. Disintegration analysis of a 110 kV transformer HV bushing fault[J]. Transformer, 2015, 52(2):72-73.
- [2] 李伟,王建,罗文华,等.750 kV 套管缺陷导致变压器突发故障问题的分析与建议[J]. 高压电器,2016,52(4):216-220.  
LI Wei, WANG Jian, LUO Wenhua, et al. Analysis and suggestion to unexpected fault problem resulted from 750 kV bushing defect in transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4):216-220.
- [3] 任晓红,王伟,郑健康,等.500 kV 变压器套管典型故障及分析[J]. 高电压技术,2008,34(11):2513-2516.  
REN Xiaohong, WANG Wei, ZHENG Jiankang, et al. Analysis of 500 kV transformer bushing typical failure[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11):2513-2516.
- [4] 戴佳民,齐波,李成榕,等.三种工况对变压器套管潮气入侵绝缘特性的影响[J]. 高电压技术,2018,44(2):554-560.  
DAI Quanmin, QI Bo, LI Chengrong, et al. Influence of moisture ingress on the insulation characteristic in oil-immigrated paper bushings under three test condition[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2):554-560.
- [5] TENBOHLEN S, JAGERS J, GEBAUER J, et al. Transformer reliability survey[R]. Paris: CIGRE A237, 2015.
- [6] 王有元,田苗,罗明武,等.水分对绝缘纸微观特性影响的分子模拟研究[J]. 高电压技术,2013,39(11):2615-2622.  
WANG Youyuan, TIAN Miao, LUO Mingwu, et al. Molecular modeling study for impact of moisture on the microscope properties of insulating paper[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11):2615-2622.
- [7] KULASINSKI K, GUYER R, KETEN S, et al. Impact of moisture adsorption on structure and physical properties of amorphous biopolymers[J]. Macromolecules, 2015, 48(8):2793-2800.
- [8] 王伟,董文妍,李芳义,等.升温过程中水分子在油纸界面处的迁移和聚集行为的分子模拟[J]. 高电压技术,2019,45(11):3539-3546.  
WANG Wei, DONG Wenyan, LI Fangyi, et al. Molecular simulation of migration and aggregation behavior of water molecules at interface of mineral oil and cellulose during rapid temperature rising[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11):3539-3546.
- [9] LIAO R J, ZHU M Z, YANG L J, et al. Molecular dynamics study of water molecule diffusion in oil-paper insulation materials[J]. Physica B: Condensed Matter, 2011, 406(5):1162-1168.
- [10] 程建伟,赵林杰,孙夏青,等.实际运行电压下特高压换流变压器阀侧套管电场分布研究[J]. 南方电网技术,2017,11(5):1-8.  
CHENG Jianwei, ZHAO Linjie, SUN Xiaqing, et al. Research on electric field distribution of valve side bushing for UHV converter transformer under actual operating voltage[J]. Southern Power System Technology, 2017, 11(5):1-8.
- [11] 张晋寅,杨旭,邓军,等. $\pm 800$  kV 柔性直流穿墙套管温升特性研究[J]. 变压器,2021,58(12):38-41,45,77.  
ZHANG Jinyin, YANG Xu, DENG Jun, et al. Study on temperature rise characteristics of  $\pm 800$  kV VSC DC wall bushing[J]. Transformer, 2021, 58(12):38-41,45,77.
- [12] 刘兴华,李蓝翔,刘涛,等.变压器局部放电带电检测技术与故障案例分析[J]. 变压器,2019,56(5):72-76.  
LIU Xinghua, LI Lanxiang, LIU Tao, et al. Analysis of live detection technology and fault cases of partial discharge in transformer[J]. Transformer, 2019, 56(5):72-76.
- [13] 穆海宝,赵浩翔,张大宁,等.变压器油纸绝缘套管多参量智能感知技术研究[J]. 高电压技术,2020,46(6):1903-1912.  
MU Haibao, ZHAO Haoxiang, ZHANG Daning, et al. Study on multi-parameter intelligent sensing technology for transformer oil-paper bushing[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(6):1903-1912.
- [14] 齐波,戴佳民,卓然,等.潮气侵入对油浸纸套管电气特性的影响[J]. 高电压技术,2017,43(8):2592-2598.  
QI Bo, DAI Quanmin, ZHUO Ran, et al. Influence of the ingress of moisture on electric characteristic of oil-immigrated paper bushings[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(8):2592-2598.
- [15] 张文峰,林春耀,孙文星,等.油纸电容式变压器套管电容心受潮的检测原理与试验研究[J]. 高压电器,2018,54(1):137-142.  
ZHANG Wenfeng, LIN Chunyao, SUN Wenxing, et al. Theoretical and experimental study on damping defect measurement of capacitive core of transformer's oil-impregnated-paper condenser bushing[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1):137-142.
- [16] 董明,刘媛,任明,等.油纸绝缘频域介电谱特征参数提取及绝缘状态相关性研究[J]. 中国电机工程学报,2015,35(23):6246-6253.  
DONG Ming, LIU Yuan, REN Ming, et al. Study of characteristic parameter extraction and insulation condition correlation of frequency-domain dielectric spectroscopy for oil-paper insulation systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23):6246-6253.
- [17] 王柯,李中为,赵丽,等.基于Kramers-Kronig 方程的油纸绝缘宽频域介电过程参数提取与分析[J]. 绝缘材料,2020,53(12):85-89.  
WANG Ke, LI Zhongwei, ZHAO Li, et al. Wide frequency domain parameters extraction and analysis of oil-paper insulation based on Kramers-Kronig function[J]. Insulating Materials, 2020, 53(12):85-89.
- [18] 张毅涛,齐波,林元棣,等.变压器油纸绝缘套管受潮缺陷频域介电谱特征[J]. 电力工程技术,2021,40(2):135-140.  
ZHANG Yitao, QI Bo, LIN Yuandi, et al. FDS characteristic of

- damp-affected oil-paper insulation transformer bushings[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(2): 135-140.
- [19] XIE J C, DONG M, HU Y Z, et al. Modeling oil-paper insulation frequency domain spectroscopy based on its microscopic dielectric processes[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(6): 1788-1796.
- [20] 吴广宁, 夏国强, 粟茂, 等. 基于频域介电谱和补偿因子的油纸绝缘水分含量和老化程度评估方法[J]. 高电压技术, 2019, 45(3): 691-700.
- WU Guangning, XIA Guoqiang, SU Mao, et al. Evaluation method for moisture content and aging degree of transformer oil-paper insulation based on frequency dielectric spectroscopy and compensation factor[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 691-700.
- [21] 梁钰, 谢佳成, 符传福, 等. 介电模量频域特性的理论分析及其应用于油纸绝缘水分含量评估的研究[J]. 高压电器, 2018, 54(12): 116-121.
- LIANG Yu, XIE Jiacheng, FU Chuanfu, et al. Theoretical analysis of dielectric modulus frequency domain characteristics and its application in the evaluation of water content in oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(12): 116-121.
- [22] 杨峰, 唐超, 周渠, 等. 基于等效电路的油纸绝缘系统受潮状态分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(21): 4586-4596.
- YANG Feng, TANG Chao, ZHOU Qu, et al. Analyzing the moisture state of oil-paper insulation system using an equivalent circuit model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(21): 4586-4596.
- [23] 周远翔, 沙彦超, 陈维江, 等. 变压器油与绝缘纸板电导特性研究[J]. 电网技术, 2013, 37(9): 2527-2533.
- ZHOU Yuanxiang, SHA Yanchao, CHEN Weijiang, et al. Conduction characteristics in transformer oil and electrical insulation paper[J]. Power System Technology, 2013, 37(9): 2527-2533.
- [24] 谢恒堃. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.
- XIE Hengkun. Design principle of electrical insulation structure[M]. Beijing: China Machine Press, 1993.
- [25] 张施令, 彭宗仁. 换流变压器套管的电气绝缘结构研究与设计优化[J]. 绝缘材料, 2020, 53(12): 65-72.
- ZHANG Shiling, PENG Zongren. Study on electrical insulation structure of converter transformer bushing and design optimization[J]. Insulating Materials, 2020, 53(12): 65-72.

#### 作者简介:



陈晓琳

陈晓琳(1984),女,硕士,高级工程师,从事电力设备状态监测及故障诊断相关工作(E-mail:46276484@qq.com);

符小桃(1990),女,硕士,工程师,从事电力设备状态监测及故障诊断相关工作;

吴乾东(1992),男,学士,工程师,从事电力设备状态监测及故障诊断相关工作。

## Partial damp diagnostic method of oil-paper insulating bushing based on frequency domain spectroscopy

CHEN Xiaolin<sup>1,2</sup>, FU Xiaotao<sup>1,2</sup>, WU Qiandong<sup>1,2</sup>, ZHAO Haoxiang<sup>3</sup>, LI Yuan<sup>3</sup>, MU Haibao<sup>3</sup>

(1. Electric Power Research Institute of Hainan Power Grid Co., Ltd., Haikou 570311, China;

2. Hainan Key Laboratory of Physical and Chemical Analysis of Power Grid, Haikou 570311, China;

3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Partial dampness is the initial stage in the bushing damp process, so the effective diagnosis of partial dampness can avoid the further development of the damp. The partial damp diagnosis method of bushing based on the frequency domain spectroscopy (FDS) is proposed in this paper. Firstly, oil-paper insulation samples with different moisture content are prepared, and partial damped samples are formed through combination. Then the FDS characteristics are obtained. The results show that partial distribution of moisture leads to oil-paper insulation interfaces with different moisture content, and the interface relaxation polarization loss peak is introduced in the FDS curves. The greater the degree of partial dampness in the radial direction, the greater the amplitude of the loss peak, and it moves to the high frequency direction. The effectiveness of the diagnosis of partial dampness of bushing based on the characteristics of the interface relaxation polarization loss peak is verified by the simulation model of the transformer bushing. It shows that a new method for early fault warning and diagnosis of the transformer bushing is provided.

**Keywords:** oil-paper insulation; high voltage bushing; partial damp; frequency domain spectroscopy (FDS); interface relaxation polarization; fault diagnosis

(编辑 方晶)