

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.06.021

# 不均匀受潮油纸绝缘套管频域介电谱仿真研究

刘伟<sup>1</sup>, 李洋<sup>2</sup>, 张璐<sup>3</sup>, 牛朝滨<sup>4</sup>, 穆海宝<sup>2</sup>, 张冠军<sup>2</sup>

(1. 国网陕西省电力公司, 陕西 西安 710048; 2. 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; 3. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 陕西 西安 710199; 4. 国网河北省电力有限公司雄安新区供电公司, 河北 保定 071800)

**摘要:** 电容型高压套管作为变电站内极为重要的电力设备之一, 其绝缘状态对电力系统的安全稳定运行至关重要。套管在生产和运行过程中, 可能因干燥不充分、浸渍不充分或外部水分入侵而受潮, 影响绝缘可靠性。由于套管电容芯子绝缘结构的特殊性, 水分通常为非均匀分布, 在外界水分侵入时尤为明显。文中通过建立油纸绝缘单元叠层和 110 kV 电容型套管数值仿真模型, 对其在不均匀受潮状态下的频域介电谱特性进行仿真分析。结果表明: 不均匀受潮时, 介质损耗因数与频率的关系曲线出现明显的介质损耗峰; 水分分布不均匀程度增大时, 损耗峰对应的频率随之增大; 频域介电谱(FDS)对套管厚度和末屏局部的含水量变化敏感, 但基本不受套管轴向不均匀受潮的影响。

**关键词:** 油纸绝缘; 电容型高压套管; COMSOL 仿真; 频域介电谱(FDS); 不均匀受潮

**中图分类号:** TM855

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)06-0143-08

## 0 引言

电容型高压套管作为电力变压器不可或缺的配套组件, 是一种典型的油纸绝缘设备。在运行过程中, 由于长期处于电、热、机械和化学等应力下, 套管的绝缘强度将会下降, 从而缩短其寿命<sup>[1-2]</sup>。据统计, 110 kV 及以上电压等级的电网中, 套管故障在变压器事故总数中占比较高, 且随电压等级升高, 占比持续上升<sup>[3]</sup>。因此, 及时有效地评估套管运行状态、准确判断其缺陷类型已成为保证设备安全和电网运行可靠性的关键课题<sup>[4-5]</sup>。

受潮是油浸纸套管绝缘故障的主要原因之一<sup>[6]</sup>。套管中的水分会导致其电气绝缘强度下降, 且缺陷极易发展扩大, 甚至引起套管损毁事故<sup>[7]</sup>。油纸绝缘套管内的水分来源主要包括生产过程中干燥工艺不完善、维修或运行中外界环境水分渗入、纤维素材料老化生成水分等。水分会促进纤维素老化, 导致产生更多的水分<sup>[8-10]</sup>, 进一步加速老化。因此, 对套管的不同受潮情况进行准确判断具有重要意义。

频域介电谱(frequency domain spectroscopy, FDS)通过较宽频率范围内的参数测量, 实现油纸绝缘水分含量的无损检测, 在工程中广泛应用。WS Zaengl 等提出基于介损曲线最小值非线性拟合的水

分评估经验公式<sup>[11]</sup>。JADAV R 等的研究表明, 水分、纸板老化及其老化产物均对油纸绝缘 FDS 产生影响, 其中水分的影响尤为显著<sup>[12]</sup>。BANDARA K 等对比研究了水分和老化对酯类油和矿物油油浸纸绝缘 FDS 特性的影响<sup>[13]</sup>。廖瑞金等设计实验研究了水分对 FDS 曲线特征的影响, 根据曲线不同频率下的介损值, 提出了评估受潮程度的经验公式<sup>[14-16]</sup>。吴广宁等将不同受潮程度样品的介损归一化到特征频率, 发现了不同频率下介损标么值的平均值与含水量的线性关系<sup>[17]</sup>。徐肖伟等提出了利用介损曲线极值点处的特征频率作为诊断参量进行套管含水量评估的方法, 并开展了基于 FDS 的套管受潮状态现场诊断和评估试验<sup>[18-19]</sup>。

油纸绝缘套管含水量评估结果一般为平均含水量。油纸绝缘套管电容芯子由绝缘纸和铝箔交替缠绕而成, 由于芯子内铝箔的阻碍作用, 水分在芯子内分布并不均匀, 尤其当设备外部受潮时, 受潮部位以外层电容屏为主。目前, 基于 FDS 的油纸绝缘状态评估鲜有对套管不均匀受潮状态的研究。基于前人在油纸绝缘 FDS 方面的相关研究成果, 文中通过 COMSOL 搭建典型模型, 对不同受潮情况油纸绝缘的 FDS 特性进行仿真分析。

## 1 麦克斯韦损耗理论

不同水分含量油浸纸的介电常数、直流电导率有所差别, 因此, 在对受潮不均匀的油纸绝缘系统施加交流电场时, 不同水分含量的油纸叠层之间会

收稿日期: 2020-05-13; 修回日期: 2020-06-25

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国工程物理研究院联合基金资助项目(U1830129)

因电荷积聚产生界面极化损耗<sup>[20-21]</sup>。

不同受潮程度的油浸纸具有不同的相对介电常数  $\varepsilon$ 、电导率  $\gamma$  等物理参数。由双层油浸纸构成的油纸叠层系统及其电路模型如图 1 所示。图中,  $U$  为施加于介质两端的电压;  $d_1, d_2$  分别为两层油浸纸的厚度;  $R_1, C_1, R_2, C_2$  分别为两层油浸纸的等效电阻和等效电容。

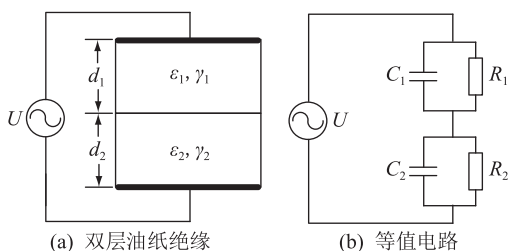


图 1 不同水分含量油纸叠层系统及其等值电路模型

Fig.1 Oil-paper layers with different water content and its equivalent circuit model

对介质施加直流电压激励, 初始时刻  $t=0$  时, 电压按电容  $C_1, C_2$  分配; 当  $t=\infty$  时, 电压按电阻分配。因此当施加直流电压于不同水分含量的双层介质后, 电压分布会逐渐由暂态向稳态过渡, 从而引起界面电荷密度变化。在此过程中, 流过介质的电流包括直流分量和容性分量, 且两者之和始终保持恒定, 即:

$$\frac{U_1}{R_1} + C_1 \frac{dU_1}{dt} = \frac{U_2}{R_2} + C_2 \frac{dU_2}{dt} \quad (1)$$

式中:  $U_1, U_2$  分别为施加于两层介质上的电压。

求解微分方程得:

$$I = I_1 = I_2 = \frac{U}{R_1 + R_2} + \frac{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2 U}{R_1 R_2 (C_1 + C_2) (R_1 + R_2)} e^{-\frac{t}{\theta}} \quad (2)$$

式中:  $I_1, I_2$  分别为流过两层介质的电流;  $I, U$  分别为介质上总的电压和电流;  $\theta$  为介质损耗角, 如式(3)所示; 式(2)中前项代表电导损耗, 后项代表界面极化空间电荷引起的吸收电流。

$$\theta = \frac{R_1 R_2 (C_1 + C_2)}{R_1 + R_2} \quad (3)$$

令:

$$\begin{cases} R = R_1 + R_2 \\ g = \frac{(R_2 C_2 - R_1 C_1)^2}{R_1 R_2 (C_1 + C_2)} \end{cases} \quad (4)$$

利用叠加原理可得:

$$I = I_a + I_c = \int_{-\infty}^t \frac{du}{dt} g e^{-\frac{t-t'}{\theta}} dt' = \frac{\omega^2 \theta^2 g U}{1 + \omega^2 \theta^2} + j \frac{\omega \theta g U}{1 + \omega^2 \theta^2} \quad (5)$$

式中:  $I_a$  为界面极化损耗电流;  $I_c$  为电容电流;  $\omega$  为角频率。

考虑电导损耗可得:

$$I_p = I_a + I_R = \frac{\omega^2 \theta^2 g U}{1 + \omega^2 \theta^2} + \frac{U}{R} \quad (6)$$

式中:  $I_p$  为总电流;  $I_R$  为电导电流。

考虑等效初始电容后, 总电容电流为:

$$I_c = j \frac{\omega \theta g U}{1 + \omega^2 \theta^2} + j \frac{\omega C_1 C_2 U}{C_1 + C_2} = j \frac{\omega \theta g U}{1 + \omega^2 \theta^2} + j \omega C_\infty U \quad (7)$$

式中:  $C_\infty$  为初始串联等效电容。

由式(6)、式(7)可得总介质损耗因数为:

$$\tan \delta = \frac{I_p}{I_c} = \frac{\frac{1}{R} + \frac{\omega^2 \theta^2 g}{1 + \omega^2 \theta^2}}{\omega \left( C_\infty + \frac{\theta g}{1 + \omega^2 \theta^2} \right)} \quad (8)$$

图 2 为忽略贯穿电导损耗后, 总电容  $C$  和  $\tan \delta$  随  $\omega$  的变化规律。

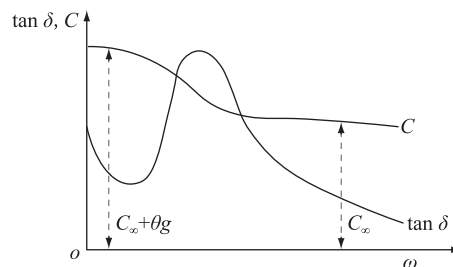


图 2 不同  $\omega$  下的  $\tan \delta$  和  $C$

Fig.2  $\tan \delta$  and  $C$  under different  $\omega$

不均匀受潮时, 界面极化损耗导致低频段损耗峰的出现, 对应的频率为:

$$\omega = \frac{1}{\theta \sqrt{(1 + \theta g / C_\infty)}} \quad (9)$$

## 2 仿真平台及模型参数设置

### 2.1 仿真平台

文中利用 COMSOL Multiphysics 数值仿真软件, 通过有限元分析, 实现多种真实物理现象的仿真。

油纸绝缘介质的 FDS 特性通过求解泊松方程获得。

$$-\nabla(\sigma + j\omega\varepsilon) \nabla V = 0 \quad (10)$$

式中:  $\nabla$  为梯度运算符;  $\sigma$  为电导率;  $\varepsilon$  为复介电常数;  $V$  为电势。

电场强度  $E$  为:

$$E = -\nabla V \quad (11)$$

通过 COMSOL Multiphysics 的 AC/DC 模块求解方程(11)可以得到阻抗  $Z$ 。则电阻  $R$ 、电抗  $X$  分

别为:

$$R = \text{Re}Z \quad (12)$$

$$X = \text{Im}Z \quad (13)$$

C 和  $\tan \delta$  分别为:

$$C = \frac{1}{2\pi fX} \quad (14)$$

$$\tan \delta = \frac{1}{2\pi fCR} \quad (15)$$

式中: $f$ 为频率。

### 2.2 仿真模型

建立双单元叠层油纸绝缘模型,如图 3 所示。参照如图 4 的变压器套管结构,建立 110 kV 油纸绝缘套管仿真模型,模型网格剖分如图 5 所示。该套管模型采用等台阶、等电容设计<sup>[22-23]</sup>,套管的各极板尺寸如表 1 所示。

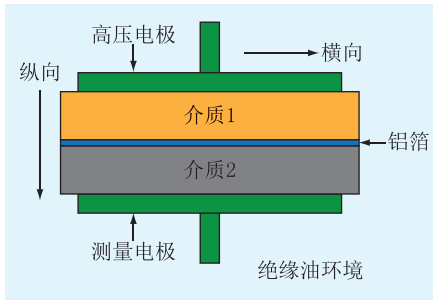


图 3 双单元叠层仿真模型

Fig.3 Simulation model of double-layer stack

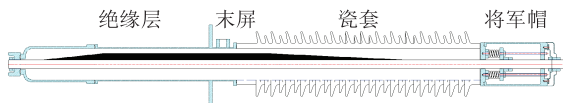


图 4 110 kV 套管仿真模型

Fig.4 Simulation model of 110 kV bushing

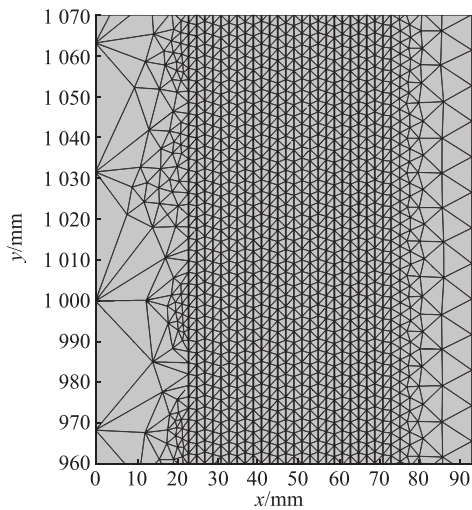


图 5 套管仿真模型局部剖分

Fig.5 Local partition of bushing simulation model

表 1 110 kV 套管极板尺寸

Table 1 Plate dimensions of the 110 kV bushing mm

极板序号	上、下台阶	极板长度	极板半径	绝缘厚度
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
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
21	28,13	844	51.61	1.32
22	28,13	805	52.90	1.29
23	28,13	766	54.16	1.26
24	28,13	726	55.38	1.22
25	28,13	687	56.56	1.18

### 2.3 参数设置

绝缘油和油浸纸的复介电常数与频率相关。其中,绝缘油的复介电常数为:

$$\tilde{\epsilon}_{oil}(\omega) = \epsilon_r - j \frac{\sigma_{DC}}{\epsilon_0 \omega} \quad (16)$$

式中: $\epsilon_r$ 为相对介电常数; $\epsilon_0$ 为真空介电常数; $\sigma_{DC}$ 为直流电导率。

通过实验,获得 50 °C 时油浸纸在频率 0.000 1~1 000 Hz 下的复介电常数  $\epsilon_p(\omega)$ 。油浸纸含水量分别为 0.59% ( $W_0$ ), 1.09% ( $W_1$ ), 2.02% ( $W_2$ ), 3.08% ( $W_3$ ), 4.12% ( $W_4$ ), 5.13% ( $W_5$ ), 部分数据如表 2 所示。

表 2 50 °C 时绝缘纸不同频率下的复介电常数  $\epsilon_p$

Table 2 Complex dielectric constant  $\epsilon_p$  of insulating paper at different frequencies (50 °C)

频率 /Hz	$W_0$		$W_1$		$W_5$	
	Re ( $\epsilon_p$ )	Im ( $\epsilon_p$ )	Re ( $\epsilon_p$ )	Im ( $\epsilon_p$ )	Re ( $\epsilon_p$ )	Im ( $\epsilon_p$ )
0.000 1	4.340 5	0.385 0	6.81	5.560 0	451	4 690
1 000	4.239 4	0.067 0	4.85	1.070 0	128	520
0.002 15	4.226 6	0.040 6	4.62	0.632 0	81.80	270
0.01	4.210 3	0.019 0	4.40	0.227 0	33.50	82.5
0.021 54	4.204 1	0.015 2	4.35	0.139 0	22.10	48.3
0.1	4.192 5	0.013 0	4.29	0.057 0	11.20	18.1
0.215 44	4.186 5	0.013 2	4.28	0.039 3	8.76	11.4
1	4.173 5	0.014 6	4.25	0.023 8	6.34	4.65
2.154 6	4.166 2	0.015 6	4.25	0.021 3	5.75	2.95
10	4.150 0	0.017 9	4.23	0.021 1	5.14	1.11
21.563	4.141 0	0.019 2	4.22	0.022 3	4.98	0.657
46.512	4.131 3	0.020 6	4.21	0.024 1	4.88	0.386
100	4.120 9	0.022 0	4.19	0.026 3	4.8	0.235
216.22	4.109 8	0.023 5	4.18	0.028 8	4.74	0.153
1 000	4.085 5	0.026 4	4.15	0.034 4	4.66	0.090 3

取不同叠层油浸纸水分含量的平均值作为油纸叠层系统的等效含水量,并定义受潮不均匀度  $D$  为:

$$D = \frac{W_{\max} - W_{\min}}{W_{\text{avg}}} \quad (17)$$

式中:  $W_{\max}, W_{\min}, W_{\text{avg}}$  分别为双叠层油纸含水量的最大值、最小值和平均值。

仿真设置的双单元叠层油纸绝缘模型等效含水量及受潮不均匀度  $D$  等参数如表 3 所示。

表 3 油纸叠层系统不同等效含水量及受潮不均匀度  $D$

Table 3 Different equivalent moisture contents and uneven degree  $D$  of oil-paper layers

等效含水量/%	叠层 1 含水量	叠层 2 含水量	$D$
1	$W_0$	$W_2$	2
	$W_1$	$W_1$	0
2	$W_0$	$W_4$	2
	$W_1$	$W_3$	1
	$W_2$	$W_2$	0
3	$W_1$	$W_5$	4/3
	$W_2$	$W_4$	2/3
	$W_3$	$W_3$	0
4	$W_3$	$W_5$	1/2
	$W_4$	$W_4$	0

### 3 仿真结果分析

根据表 2 和表 3 中的参数,设置仿真模型中各部分油浸纸的含水量,通过 COMSOL 仿真软件对双单元叠层油纸绝缘模型、套管模型在不同受潮类型下的 FDS 特性进行仿真分析。

#### 3.1 均匀受潮双单元叠层模型 FDS 特性

均匀受潮双单元叠层模型 FDS 仿真结果见图 6。频段范围为 0.1 mHz~1 kHz,仿真电压峰值为 200 V。

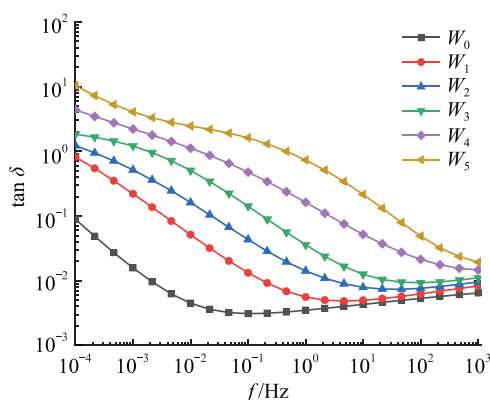
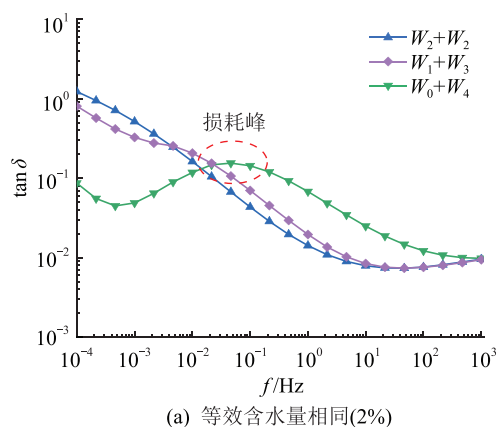


图 6 均匀受潮时不同含水量下的  $\tan \delta - f$  仿真结果  
Fig.6 The simulation results of  $\tan \delta - f$  under different moisture contents in uniform damp condition

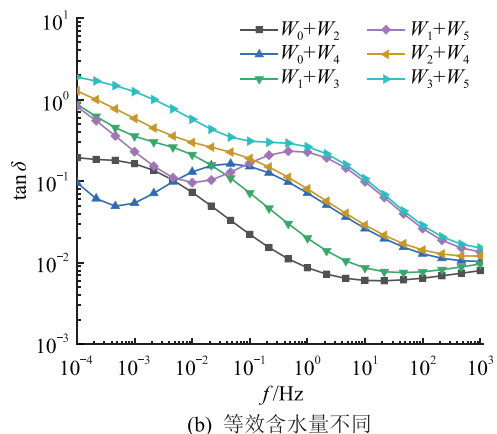
由图 6 可知,当水分含量增加时,  $\tan \delta$  在整个频段内均增长。从整个频段上看,6 条介损曲线近似呈“纺锤形”分布。当频率较高时,随着水分含量增大,介损曲线增加幅度变小;当频率较低时,介损曲线的增幅随着含水量的增大而增大,且在特定频率下幅值呈现指数式增长。当水分含量低于 3.08% 时,介损曲线在整个频率范围内呈现“对勾”形状;当  $f < 1$  Hz 时,  $\tan \delta - f$  曲线增长的幅度较大;当  $f > 1$  Hz 时,介损曲线的增长幅度较高频时急剧减小。当水分含量高于 3.08% 时,  $\tan \delta - f$  曲线在整个频率范围内呈现一定程度“凸起”;当  $f < 0.01$  Hz 时,介损曲线增长幅度较低水分含量时有所减小;当  $f$  在 0.01~100 Hz 时,  $\tan \delta - f$  曲线随着水分含量增加,增长幅度变大,  $f > 100$  Hz 时,介损曲线幅值的增长速度又有所降低。

#### 3.2 不均匀受潮双单元叠层模型 FDS 特性

为探究不均匀受潮时的 FDS 特性,将不同含水量的油浸纸进行组合,取不同叠层油浸纸水分含量平均值作为油纸叠层系统的等效含水量,仿真结果如图 7 所示。由图可知,当等效含水量相近时,水分不均匀分布对测试结果影响较大。



(a) 等效含水量相同(2%)



(b) 等效含水量不同

图 7 不均匀受潮时不同含水量下的  $\tan \delta - f$  仿真结果  
Fig.7 The simulation results of  $\tan \delta - f$  under different moisture contents in non-uniform damp condition



由图 7 可知,油纸绝缘双层模型不均匀受潮时,在中低频段出现明显的介质损耗峰。在相同等效含水量下,随着模型不均匀度的增大, $\tan \delta-f$  曲线的波动程度明显增加,介质损耗峰的频率增大,峰值幅值降低。当不均匀度相同时,双层模型的等效含水量越大, $\tan \delta-f$  曲线的损耗峰频率越高。

图 8 为油纸绝缘不均匀受潮仿真模型的横向截面场强。对贴近测试电极处的绝缘纸横向截面场强进行分析,当油纸绝缘仿真模型不均匀受潮时,横向截面场强随频率变化出现峰值,且等效含水量越高,横向截面场强的峰值频率越大;当仿真模型的受潮不均匀度越大时,其横向截面场强也越大。分析表明,不均匀受潮时,介质内部的局部场强随频率而变化,并在特定频率出现极大值,此时更容易发生局部放电等故障。

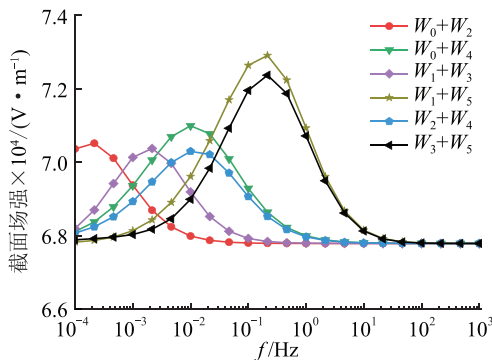


图 8 不均匀受潮时横向截面场强

Fig.8 Transverse section field strength in non-uniform damp condition

### 3.3 不均匀受潮套管模型 FDS 特性

油浸式套管若自身密封不严会引起内部油纸绝缘受潮,受潮后水分将通过绝缘油液环境进入绝缘纸、板,由于绝缘纸吸附水分子的能力远高于绝缘油,故当含水量未高到形成沉积水时,水分绝大多数存在于绝缘纸内。绝缘纸间通过贴覆铝箔构成电容屏,由于铝箔的阻水性,水分在电容屏间以轴向扩散为主,导致套管末屏局部受潮。文中利用 COMSOL 有限元分析软件,建立图 5 对应的二维轴对称套管模型。

文中建立的不均匀受潮模型中,套管受潮部位均为末屏, $N_{\text{layer}}$  为单元叠层数, $S_{\text{ratio}}$  为受潮部位与本层电容屏的面积比。110 kV 变压器套管不均匀受潮仿真参数如表 4 所示。套管末屏受潮部位含水量不同,而  $N_{\text{layer}}$ ,  $S_{\text{ratio}}$  保持不变,且除末屏受潮部分外其余部位含水量均为 0.59% ( $W_0$ )。末屏受潮程度越大,套管整体受潮不均匀度越大。

图 9 为均匀受潮时套管模型的  $\tan \delta-f$  曲线,

表 4 110 kV 变压器套管不均匀受潮仿真参数

Table 4 Simulation parameters of 110 kV transformer bushing under non-uniform moisture content

变压器套管不均匀受潮模型	变压器套管绝缘水分分布	
	末屏受潮部位含水量	其他部位含水量
$B_0$	$W_0$	$W_0$
$B_1$	$W_1$	$W_0$
$B_2$	$W_2$	$W_0$
$B_3$	$W_3$	$W_0$
$B_4$	$W_4$	$W_0$
$B_5$	$W_5$	$W_0$

$\tan \delta-f$  曲线与双单元叠层仿真模型略有不同,但介损随频率变化趋势、曲线受水分影响规律等特征高度相似。

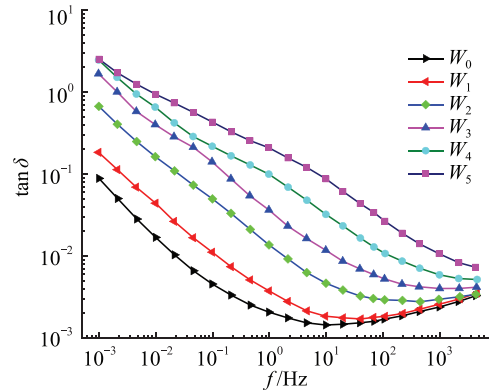


图 9 均匀受潮时套管模型的  $\tan \delta-f$  曲线

Fig.9  $\tan \delta-f$  curves of the bushing models under uniform moisture content

图 10 为不均匀受潮时套管模型的  $\tan \delta-f$  曲线。随着受潮不均匀度增大, $\tan \delta-f$  曲线出现明显的介质损耗峰,与麦克斯韦损耗理论相符。不均匀与均匀受潮曲线存在重合点,随着受潮不均匀度增大,重合点频率向高频方向移动。在中低频段,不均匀受潮曲线之间存在交点。在交点左侧,不均匀受潮程度更大的曲线其幅值明显减小;在交点右侧,不均匀受潮程度更大的曲线其幅值明显增大。

图 11 为不同电容层数套管模型的  $\tan \delta-f$  曲线。当套管末屏受潮而内层电容屏水分含量较低时,随着单元叠层数的增加,介损曲线损耗峰峰值减小,且损耗峰所对应的频率逐渐增大。

图 12 为 10 单元叠层受潮部位含水量相同、 $S_{\text{ratio}}$  取值不同时的仿真结果。由图可知, $\tan \delta-f$  曲线对受潮面积的变化并不敏感,除  $S_{\text{ratio}} = 0.8$  外,其余情形下的  $\tan \delta-f$  曲线几乎重合。不同  $X$  值时,仅受潮面积改变,受潮部位的含水量未改变,整体  $\tan \delta-f$  曲线形状主要取决于模型中的水分较高者,由于含水量未改变,所以曲线特征变化较小。

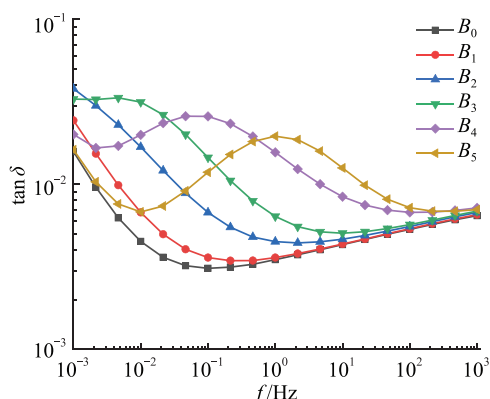


图 10 不均匀受潮时套管模型的  $\tan \delta$ - $f$  曲线  
Fig.10  $\tan \delta$ - $f$  curves of the bushing models under non-uniform moisture content

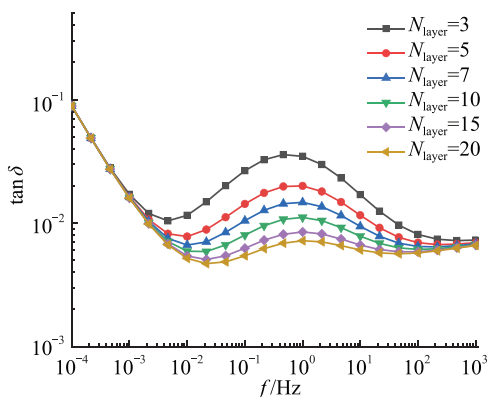


图 11 不同电容层数套管模型的  $\tan \delta$ - $f$  曲线  
Fig.11  $\tan \delta$ - $f$  curves of the bushing models with different insulating layers

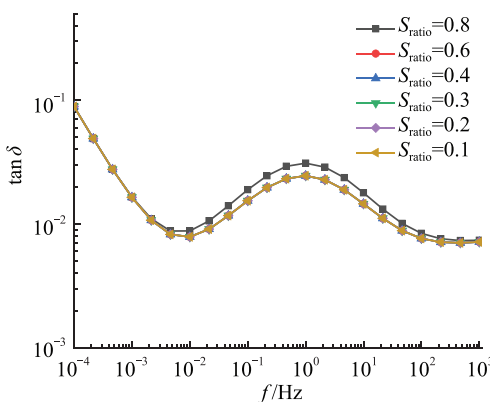


图 12 套管末屏局部受潮面积不同时的 FDS 特性  
Fig.12 FDS characteristic of bushing end screen under different moisture areas

对套管末屏局部受潮仿真模型的 FDS 特性分析发现, FDS 特征对套管厚度和末屏局部含水量的变化较为敏感, 而与末屏的局部受潮区域大小关系较弱, 即套管径向不均匀受潮对 FDS 特性的影响较大, 而套管轴向不均匀受潮对 FDS 特性影响很小。因此在套管模型仿真过程中, 可忽略横向叠层间的

水分分布不均匀对 FDS 特性的影响。

套管末屏含水量不同时, 套管模型的  $\tan \delta$ - $f$  曲线特征差异很大: 随着末屏局部含水量的增加,  $\tan \delta$ - $f$  曲线呈现明显的损耗峰特征, 并且峰值频率向高频方向移动, 与套管末屏局部受潮模型的曲线特征相似。该套管包含 20 多层电容屏, 即使只有某一电容屏出现含水量过高,  $\tan \delta$ - $f$  曲线特征较均匀受潮时也有较大改变。可见, 利用 FDS 对套管不均匀受潮进行诊断具有较高的可行性。

#### 4 结论

文中利用 COMSOL 对不均匀受潮时油纸绝缘及其套管的 FDS 特性进行仿真, 通过分析 FDS 的变化规律, 得出以下结论:

(1) 在油浸纸绝缘系统中, 当水分分布不均匀时, 由于界面极化损耗, FDS 曲线在低频段出现介质损耗峰, 且随着水分分布不均匀度的增加, 损耗峰逐渐向高频段移动, 不均匀程度越大时曲线的波动越大。

(2) 套管不均匀受潮时, 径向不均匀受潮对 FDS 特性影响较大, 而轴向不均匀受潮对 FDS 特性影响很小;

(3) 套管不均匀受潮时, 根据均匀含水量模型对其进行水分评估, 难以反映套管真实的受潮状态。文中基于界面极化损耗理论, 利用 COMSOL 仿真获得了油纸绝缘套管模型在不均匀受潮时的 FDS 特征, 为 FDS 的现场应用提供了理论依据。

本文得到国网陕西省电力公司科技项目“基于多参量综合监测的少油设备绝缘状态不停电检测技术”资助, 谨此致谢!

#### 参考文献:

[1] 段宗超, 吴广宁, 高波, 等. 油纸绝缘频域介电谱特性与聚合度的关联影响规律研究[J]. 电网技术, 2014, 38(10): 2881-2887.  
DUAN Zongchao, WU Guangning, GAO Bo, et al. Study of linkage effects between degree of polymerization and frequency domain dielectric spectroscopy characteristics of oil-paper insulation[J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2881-2887.

[2] 郝建, 廖瑞金, 杨丽君, 等. 应用频域介电谱法的变压器油纸绝缘老化状态评估[J]. 电网技术, 2011, 35(7): 187-193.  
HAO Jian, LIAO Ruijin, YANG Lijun, et al. Aging status assessment of power transformer oil-paper insulation by frequency-domain dielectric spectroscopy [J]. Power System Technology, 2011, 35(7): 187-193.

[3] 张璐, 孙蕾, 付斌, 等. 基于介电响应特性的变压器套管绝缘状态检测技术[J]. 变压器, 2019, 56(11): 70-74.  
ZHANG Lu, SUN Lei, FU Bin, et al. On-line monitoring technol-

- ogy of transformer bushing insulation based on dielectric response characteristics[J]. *Transformer*, 2019, 56(11):70-74.
- [4] 郑一鸣,何文林,孙翔,等. 基于油色谱超立方映射的电力变压器缺陷援例诊断模型[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(4):48-53.
- ZHENG Yiming, HE Wenlin, SUN Xiang, et al. Case based power transformer defects diagnose model using hypercube mapping of oil chromatography[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(4):48-53.
- [5] 杨晓辉,尹玉君,寇晓适. 基于风险评估的特高压受端电网输电设备检修策略研究[J]. *电力工程技术*, 2017, 36(2):72-75, 93.
- YANG Xiaohui, YIN Yujun, KOU Xiaoshi. Research on the maintenance strategy of UHV receiving end power grid transmission equipment based on risk assessment[J]. *Electric Power Engineering Technology*, 2017, 36(2):72-75, 93.
- [6] 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 Yimin, 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.
- [7] 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.
- [8] 周利军,李先浪,段宗超,等. 纤维素老化对油纸绝缘水分扩散特性的影响机制[J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(21):3541-3547.
- ZHOU Lijun, LI Xianlang, DUAN Zongchao, et al. Influence of cellulose aging on characteristics of moisture diffusion in oil-paper insulation[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(21):3541-3547.
- [9] CLARK F M. Factors affecting the mechanical deterioration of cellulose insulation[J]. *Electrical Engineering*, 1942, 61(10):742-749.
- [10] SHROFF D H, STANNETT A W. A review of paper aging in power transformers[J]. *Generation Transmission & Distribution IEE Proceedings C*, 1985, 132(6):312-319.
- [11] WS Zaengl. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment. I. Theoretical considerations[J]. *Electrical Insulation Magazine*, IEEE, 2003, 19(5):5-19.
- [12] JADAV R, EKANAYAKE C, SAHA T. Understanding the impact of moisture and ageing of transformer insulation on frequency domain spectroscopy[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014, 21(1):369-379.
- [13] BANDARA K, SAHA T K, EKANAYAKE C. Influence of moisture and ageing on dielectric response of ester and mineral oil impregnated pressboard insulation[C]//*Power & Energy Engineering Conference. IEEE*, 2015.
- [14] 孙会刚. 水分对油纸绝缘热老化及寿命的影响与热老化程度表征研究[D]. 重庆:重庆大学, 2011.
- SUN Huigang. Study on influence of moisture on thermal aging & life and thermal aging condition evaluation of oil-paper insulation[D]. Chongqing:Chongqing University, 2011.
- [15] 马志钦. 变压器油纸绝缘的频域介电响应特性与绝缘状态评估方法研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
- MA Zhiqin. Study on frequency domain dielectric response characteristics and insulation state evaluation methods of oil-paper insulation for transformers[D]. Chongqing:Chongqing University, 2012.
- [16] 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.
- [17] 李伟,曹保江,刘平,等. 基于频域介电谱法的绝缘纸聚合度和水分含量预测的新方法[J]. *绝缘材料*, 2014, 47(6):91-96.
- LI Wei, CAO Baojiang, LIU Ping, et al. New method for predicting degree of polymerization and water content of insulation paper based on frequency domain dielectric spectroscopy[J]. *Insulation Materials*, 2014, 47(6):91-96.
- [18] 徐肖伟,刘伟迪,王科,等. 水分对电容式油纸绝缘套管频域介电谱的影响[J]. *绝缘材料*, 2018, 51(2):62-67.
- XU Xiaowei, LIU Weidi, WANG Ke, et al. Influence of water content on frequency domain spectroscopy of capacitive oil-paper insulation bushing[J]. *Insulation Materials*, 2018, 51(2):62-67.
- [19] 徐肖伟,孙兆臣,刘光祺. 基于频域介电谱法的套管受潮状态现场评估[J]. *云南电力技术*, 2019, 47(3):30-33.
- XU Xiaowei, SUN Zhaochen, LIU Guangqi. In-situ evaluation of bushing damp condition based on frequency domain dielectric spectroscopy[J]. *Yunnan Electric Power*, 2019, 47(3):30-33.
- [20] 刘玉仙. 变压器油纸绝缘的含湿分析及其对运行安全的影响[J]. *变压器*, 2002, 39(5):1-6.
- LIU Yuxian. Moisture content analysis of oil-paper insulation in transformer and its influence on operation safety[J]. *Transformer*, 2002, 39(5):1-6.
- [21] 李忠华,索长友,郑欢,等. 双层 a+bE 非线性电导介质界面极化特性的理论研究[J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(24):6635-6646.
- LI Zhonghua, SUO Changyou, ZHENG Huan, et al. A theoretical study on the interface polarization properties of nonlinear double-layered dielectrics with a+bE nonlinear conductance[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(24):6635-6646.

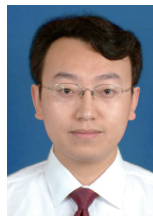
[22] 谢恒堃. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1993.

XIE Hengkun. Design principle of electrical insulation structure[M]. Beijing:China Machine Press,1993.

[23] 王仲奕,童军心,赵彦珍. 高压交直流电容式套管内部电场的分析比较及改进[J]. 高压电器,2003,39(3):9-11.

WANG Zhongyi, TONG Junxin, ZHAO Yanzhen. Comparison, analysis and improvement of the electric field distribution in high voltage AC and DC capacitive bushings[J]. High Voltage Apparatus, 2003, 39(3):9-11.

作者简介:



刘伟

刘伟(1977),男,硕士,高级工程师,从事电网电能质量、状态检修、状态监测应用相关工作(E-mail:powerxalw@163.com);

李洋(1996),男,硕士在读,研究方向为电力设备状态检测与评估技术;

张璐(1987),男,博士,高级工程师,从事气体绝缘开关设备绝缘特性研究和变压器状态检修工作。

## Simulation of frequency domain spectroscopy characteristics of oil-paper insulated bushing under non-uniform moisture content

LIU Wei<sup>1</sup>, LI Yang<sup>2</sup>, ZHANG Lu<sup>3</sup>, NIU Chaobin<sup>4</sup>, MU Haibao<sup>2</sup>, ZHANG Guanjun<sup>2</sup>

(1. State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710048, China; 2. State Key Library of Electrical Insulation and Power Equipment(Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China; 3. State Grid Shaanxi Electric Power Company Research Institute, Xi'an 710199, China; 4. State Grid Xiongan New Area Power Supply Company of Hebei Electric Power Co., Ltd., Baoding 071800, China)

**Abstract:** Capacitive high-voltage bushing is one of the most important power equipment in substations, and their insulation status is very important for safe and stable operation of the power system. During the production and operation, insufficient drying or impregnation and ingress of external moisture may result in the humidified and unreliable insulation of bushings. Due to the particularity of the structure of the bushing, moisture is usually unevenly distributed in the capacitor core, especially in the case of external moisture intrusion. Therefore, a numerical simulation model of oil-paper-insulated double-unit laminated and 110 kV capacitor bushing is established. Frequency domain spectroscopy (FDS) characteristics under non-uniform moisture conditions are simulated. The results show that when the moisture is uneven, the  $\tan \delta$ - $f$  curve shows obvious dielectric loss peaks. The frequency corresponding to the loss peaks goes up with the increase of the unevenness of moisture distribution. The FDS is sensitive to the insulation thickness and the moisture content in the final screen, and is basically not affected by the uneven axial moisture of the bushing.

**Keywords:** oil-paper insulation; capacitive high voltage bushing; COMSOL simulation; frequency domain spectroscopy (FDS); non-uniform damp condition

(编辑 吴楠)