

基于频域介电谱法的油浸式套管受潮状态评估

周利军¹, 刘伟迪¹, 王东阳¹, 潘刚¹, 李会泽¹, 徐肖伟²

(1. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 610031;

2. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 云南 昆明 650217)

摘要:为了定量评估油浸式套管主绝缘受潮状态,建立了考虑直流电导的 Cole-Cole 双弛豫模型。对实验室制备的不同含水量(0.53%、1.78%、2.97%、3.89%、5.03%)的 72.5 kV 油浸式套管模型进行测试得到对应的频域介电谱,采用建立的 Cole-Cole 双弛豫模型对测试结果进行拟合解析,提取表征油浸式套管内绝缘含水量的特征参数,并拟合评估公式。考虑温度对现场测试结果的影响,提出了适用于现场的油浸式套管受潮状态评估方法。案例分析结果证明了所提方法的有效性。

关键词:电力变压器;套管;绝缘;频域介电谱;Cole-Cole 模型;含水量;定量评估

中图分类号:TM 41

文献标识码:A

DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2018.11.020

0 引言

油浸式套管是大型电力变压器重要的附属装置,起到将高低压引线从变压器内部引出的作用,实现变压器与外部电气网络的连接以及引线对变压器外壳的绝缘^[1]。油浸式套管主绝缘为绝缘纸与铝箔电容屏交替包绕卷制的电容芯子。实际运行中,水分通过将军帽、取油塞、油枕等典型位置入侵套管内部。套管绝缘纸受潮将降低油纸绝缘的机械强度和电气强度,加剧缩短套管绝缘寿命,严重时会引起电力变压器的安全故障,威胁区域电网可靠运行。

目前工程现场多应用工频介损测量法对油浸式套管受潮状态进行诊断^[2]。在长期的工程实践中发现,该方法不能灵敏地反映套管水分含量的变化,工频介损值发生明显变化时,套管主绝缘往往已经严重受潮。能够直接测定绝缘纸中含水量的卡尔费休法却受现场取样条件和油纸平衡状态的限制,通常多用于实验室研究中^[3]。近年来,频域介电谱法 FDS(Frequency-Domain Spectroscopy) 由于具有测试电压低且无损、携带绝缘信息丰富、抗干扰能力强等优点,逐渐得到了相关学者的广泛关注与研究^[4-5]。

目前,学者们已经通过试验研究并明确了老化、水分、温度等因素对油纸绝缘频域介电响应测试结果的影响特征^[6-7],分频段研究并解析了测试频率范围内的油纸绝缘介电响应特性、损耗主导机制以及解释模型^[8],采用现有或根据试验结果修正后的介电弛豫模型(Debye 模型、Cole-Cole 模型、H-N 模型)^[9-11]拟合测试结果,进而提出相应的特征参量,对油纸绝缘的绝缘状态进行评估与诊断^[12]。相关研究表明,油纸绝缘频域介电响应的低频部分对其

水分含量的变化十分敏感,并且 Cole-Cole 双弛豫模型能够通过尽可能有限个数的模型参数有效地反映油纸绝缘介电响应特性。

在上述研究的基础上,相关学者通过研究已经提出了基于频域介电响应法的油浸式变压器老化与水分含量状态定量诊断方法,并且在现场得到了有效的应用^[13],然而由于变压器油纸绝缘系统较为复杂(由油隙、撑条、油浸纸板等共同组成),微水扩散关系复杂,如何准确地实现变压器油纸绝缘含水量现场定量分析仍需进一步研究。油浸式套管主绝缘为绝缘纸与铝箔交替包绕卷制而成的电容芯子,其结构较为单一,已有学者对受潮、老化作用下油浸式套管的频域介电谱特性开展了研究^[14-16]。因此基于频域介电响应法的油浸式套管水分含量定量诊断是可能实现且相对容易的。

本文基于频域介电响应法对油浸式套管水分含量的定量评估进行了研究:首先对 72.5 kV 油浸式套管模型进行受潮处理,测试得到了不同水分含量下套管主绝缘的频域介电谱,然后拟合得到修正 Cole-Cole 模型参数,采用数值拟合建立模型参数与水分含量的函数关系,最后提出了考虑温度影响的油浸式套管水分含量定量评估方法,并通过现场测试对所提方法进行了验证与应用。

1 频域介电谱原理及模型分析

1.1 频域介电谱原理

电介质响应是由于电介质内部极化的建立难以响应电场频率的变化导致的结果,在时变电场作用下,其两端产生的电通量密度 $D(t)$ 由极化强度 $P(t)$ 和外部电场场强 $E(t)$ 2 个分量决定:

$$D(t) = \varepsilon_0 E(t) + P(t) \quad (1)$$

其中, ε_0 为真空介电常数。不同电介质的组成结构和不同成分将使得极化过程中产生不同的极化机

收稿日期:2017-11-15;修回日期:2018-07-20

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877183)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877183)

制。极化在建立的过程中总是滞后于外加时变电场的变化,通常用介电响应函数 $F_{\text{edr}}(t)$ 来表征这种保持原有态势能力的现象。每种极化机制的极化强度 $P(t)$ 由瞬时极化强度 P_{∞} 和松弛极化强度 P_r 组成,可分别表示为:

$$P_{\infty}(t) = \varepsilon_0(\varepsilon_r - 1)E(t) \quad (2)$$

$$P_r(t) = \varepsilon_0 \int_0^{\infty} F_{\text{edr}}(x)E(t-x) dx$$

其中, ε_r 为相对介电常数。

由式(2)可将式(1)表示为:

$$D(t) = \varepsilon_0 E_0 \left[(\varepsilon_{\infty} - 1) + 1 + \int_0^t F_{\text{edr}}(x) dx \right] \quad (3)$$

其中, ε_{∞} 为高频介电常数; E_0 为 $t \geq 0$ 时的外部电场。

麦克斯韦方程式认为,全电流密度 $J(t)$ 是由传导电流密度和位移电流密度组成,分别由自由电荷在外电场下定向运动和外加电场变化引起。

$$J(t) = \sigma_0 E(t) + \partial D(t) / \partial t \quad (4)$$

对式(3)进行傅里叶变换,再代入式(4)可得式(5)。

$$J(\omega) = [\sigma_0 + j\omega\varepsilon_0(\varepsilon_{\infty} - 1 + \chi'(\omega) - j\chi''(\omega))]E(\omega) =$$

$$[(\sigma_0 + \omega\varepsilon_0\chi''(\omega) + j\omega\varepsilon_0(\varepsilon_{\infty} + \chi'(\omega)))]E(\omega) =$$

$$j\omega\varepsilon_0(\varepsilon'(\omega) - j\varepsilon''(\omega))E(\omega) \quad (5)$$

其中, σ_0 为电介质直流电导; χ' 为极化系数的实部,表征极化幅值,与激励电场的相位始终保持一致; χ'' 为极化系数的虚部,其滞后电场 90° ; ε' 为复电介质常数的实部,其为全电流的容性电流密度,表征电介质材料的介电常数; ε'' 为复电介质常数的虚部,其为全电流阻性电流密度。

用来表征电介质材料的介质损耗因数 $\tan \delta$ 可定义为:

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{\sigma_0 / (\omega\varepsilon_0) + \chi''(\omega)}{\varepsilon_{\infty} + \chi'(\omega)} \quad (6)$$

介质损耗因数反映了流经介质的有功电流密度与无功电流密度之比,其大小与电介质的绝缘几何结构无关。

1.2 介电弛豫模型分析

K. S. Cole 和 R. H. Cole 在经典 Debye 弛豫模型基础上,根据偏离的形状和程度对弛豫过程进行理论上的修正,引入弛豫分布参数 α 的概念,提出单一弛豫过程下的 Cole-Cole 模型^[17]:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon_{\infty} + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_{\infty}}{1 + (j\omega\tau)^{1-\alpha}} \quad (7)$$

其中, ε_s 为静态介电常数; τ 为平均弛豫时间常数; α 为代表极化过程的分布参数, $\alpha \in (0, 1)$ 。实际测试中,频率在 $(0.001, 0.1)$ Hz 范围内时, $\varepsilon''(\omega)$ 具有以电导损耗为主的损耗特性^[8],因此必须考虑直流电

导率 σ_{dc} 对弛豫过程产生的影响。

一般情况下,从非均匀体系(多相体系)的介电谱中观测到的介电弛豫个数 n 等于体系组成相的个数 m ^[18]。考虑到套管主绝缘为油纸绝缘两相绝缘体系,介电弛豫的个数 $n=2$ 。相应地,带直流电导率的修正 Cole-Cole 双弛豫模型可写为:

$$\varepsilon(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \frac{\Delta\varepsilon_1}{1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}} + \frac{\Delta\varepsilon_2}{1 + (j\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} + \frac{\sigma_{\text{dc}}}{j\varepsilon_0\omega} \quad (8)$$

$$\Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_2 = \varepsilon_s - \varepsilon_{\infty} \quad (9)$$

其中, $\Delta\varepsilon_1$ 、 $\Delta\varepsilon_2$ 分别为界面极化和偶极子转向极化的弛豫强度; τ_1 、 τ_2 分别为界面极化和偶极子转向极化的弛豫时间; α_1 、 α_2 分别为界面极化和偶极子转向极化的分布参数。

根据修正 Cole-Cole 双弛豫模型,结合式(8),复介电常数实部 ε' 和虚部 ε'' 可以表示为:

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_{\infty} + \text{Im} \left[\frac{\Delta\varepsilon_1}{1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}} + \frac{\Delta\varepsilon_2}{1 + (j\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} \right] \quad (10)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \frac{\sigma_{\text{dc}}}{\varepsilon_0\omega} - \text{Re} \left[\frac{\Delta\varepsilon_1}{1 + (j\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}} + \frac{\Delta\varepsilon_2}{1 + (j\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}} \right] \quad (11)$$

2 油浸式套管绝缘实验

2.1 实验材料预处理

本文首先依据行业标准设计并制作了 72.5 kV 油浸式套管模型^[19]。电容芯子结构如图 1 所示,电容芯子设计 17 层铝箔电容屏,与绝缘纸交替包绕中心铝管卷制而成。从电容芯子中心铝管开始每 3 层绝缘层卷入一层薄绝缘纸带,作为进行萃取滴定测试含水量的样品。本文用于制备套管模型的电容芯子材料为 0.1 mm 厚度绝缘纸、0.03 mm 厚度铝箔以及 45 号克拉玛依矿物油。为了降低绝缘纸中初始水分对实验产生的影响,实验采用的绝缘纸在卷制电容芯子前先在 $110^\circ\text{C}/50\text{ Pa}/48\text{ h}$ 的条件下进行真空干燥,同时对 45 号矿物油进行真空脱气处理。根据 IEC60814—1998 标准,使用卡尔费休滴定仪对处理后的绝缘纸和矿物油进行水分测试,分别得到绝缘纸初始含水量为 0.35%,油中含水量为 0.000 9%。

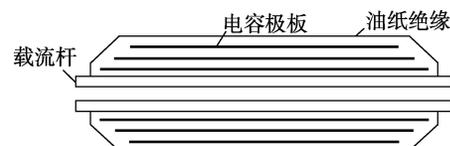


图 1 电容芯子组成结构

Fig.1 Composition structure of capacitive core

套管外绝缘用环氧树脂筒替代,将卷制完成的电容芯子在 $110^\circ\text{C}/50\text{ Pa}$ 的条件下进行 48 h 的干燥处理后,置于环氧树脂筒中与 45 号克拉玛依矿物油进行充分混合,在 40°C 的恒温真空环境下充分浸

渍 4 d。

2.2 实验流程

本文制备了含水量不同的套管模型,并将套管模型封盖打开,采用自然吸潮和加速受潮相结合的受潮方式对充分浸渍后的套管内绝缘进行受潮处理,受潮条件如表 1 所示。

表 1 不同含水量的套管模型制备条件
Table 1 Preparation conditions of different water content casing models

含水量/%	受潮条件
0.53	15 ℃,自然空气,2 d
1.78	15 ℃,自然空气,10 d
2.97	15 ℃,自然空气,15 d
3.89	20 ℃,80%相对湿度加湿空气,20 d
5.03	20 ℃,80%相对湿度加湿空气,25 d

按照 IEC60814—1998 标准,采用卡尔费休自动电量滴定法测定绝缘液体、油浸纸及油浸纸板水分时的测试准则对套管绝缘含水量进行测试。在不同的试样制备阶段抽取一定长度的卷制在绝缘层间的含水量测试样品。为保证测试的准确性,在不同受潮阶段对最内层、最外层、中间层的样品分别进行 3 次测试,取平均值得到处于不同阶段的含水量为 0.53%、1.78%、2.97%、3.89%、5.03% 的套管模型。在不同阶段,分别对不同含水量的测试样品进行 15 ℃ 恒温条件下的频域介电谱测试。

本文对套管模型进行频域介电谱测试时,通过升压设备对套管模型施加有效值为 1 400 V、频率为 1 mHz~1 kHz 的测试电压。

3 实验结果分析

3.1 含水量对套管频域介电谱的影响

图 2 为不同含水量的套管模型在 15 ℃ 恒温条件下的频域介电谱测试曲线。图中, C_m 为含水量。

由图 2(a) 可见:随着外加电场频率的逐渐降低,复介电常数实部 ε' 整体呈现由低到高的变化趋势;当测试电压频率在 $[10^{-3}, 10]$ Hz 范围内时,含水量变化引起的 ε' 的差异更为明显,这说明 ε' 在低频部分对含水量的变化相对敏感。

由图 2(b) 可见:在整个测试频段内,不同含水量下的复介电常数虚部 ε'' 均随着外加电场频率增大而呈现出先减小到极值,然后继续增大的变化趋势,且随着测试样品含水量的升高,极值点频率逐渐向高频方向移动;当测试电压频率在 $[10^{-3}, 10^2]$ Hz 范围内时, ε'' 的曲线分布较为分散,含水量变化引起的 ε'' 的差异较为明显。

3.2 基于 Cole-Cole 双弛豫模型的特征量提取

根据式 (10)、(11),基于图 2 数据利用 MATLAB 通过非线性最小二乘法对 Cole-Cole 双弛豫模型进行参数拟合,在进行拟合时,需要同时考虑

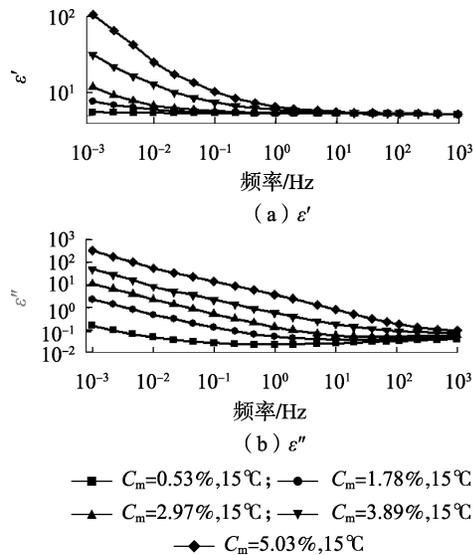


图 2 15 ℃ 恒温条件下,不同含水量的套管模型的频域介电谱

Fig.2 Frequency-domain dielectric spectra of bushing models with different moisture contents under 15 ℃ condition

ε' 曲线和 ε'' 曲线对应的模型参数,因此应建立使拟合数据 ε'_{fit} 、 ε''_{fit} 与测试数据 ε'_{test} 、 ε''_{test} 的误差平方和 θ 最小的约束目标函数,以保证模型参数拟合结果的唯一性和准确性,如式 (12) 所示。

$$\theta = \sum \left[\left(\frac{\varepsilon'_{test} - \varepsilon'_{fit}}{\varepsilon'_{test}} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon''_{test} - \varepsilon''_{fit}}{\varepsilon''_{test}} \right)^2 \right] \quad (12)$$

经过反复验证,解决上述最优化问题的边界条件为: $0 < \varepsilon_{\infty} < 10$, $10^{-11} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1} < \sigma_{dc} < 10^{-4} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$, $0.1 < \Delta\varepsilon_1 < 400$, $10 \text{ s} < \tau_1 < 10\ 000 \text{ s}$, $0.1 < \Delta\varepsilon_2 < 20$, $10^{-12} \text{ s} < \tau_2 < 10^{-6} \text{ s}$, $\alpha_1 > 0$, $\alpha_2 < 1$ 。通过拟合得到的 Cole-Cole 双弛豫模型参数如表 2 所示。

表 2 不同含水量下的修正 Cole-Cole 双弛豫模型拟合参数
Table 2 Fitting parameters of modified Cole-Cole double relaxation model with different moisture contents

含水量/%	ε_{∞}	$\Delta\varepsilon_1$	τ_1/s	α_1	$\Delta\varepsilon_2$	τ_2/ns	α_2	$\sigma_{dc}/(\text{s} \cdot \text{m}^{-1})$
0.53	3.06	2.36	4 260.1	0.36	1.10	10.90	0.86	7.02×10^{-9}
1.78	2.92	11.44	1 073.2	0.41	2.25	6.16	0.76	1.04×10^{-7}
2.97	3.01	22.01	433.1	0.33	3.44	3.76	0.83	5.13×10^{-7}
3.89	2.85	75.60	399.4	0.40	5.19	2.84	0.94	4.00×10^{-6}
5.03	3.14	199.99	159.4	0.28	7.80	1.99	0.91	1.99×10^{-5}

由表 2 可知,随着含水量的增加,界面极化弛豫强度 $\Delta\varepsilon_1$ 和偶极子转向极化弛豫强度 $\Delta\varepsilon_2$ 逐渐增大;界面极化弛豫时间 τ_1 和偶极子转向弛豫极化时间 τ_2 逐渐减小。可以看出,随着水分进入套管油纸绝缘,绝缘纸纤维素间的束缚作用被削弱,加强了偶极子位移极化作用。强极性水分子进入油纸绝缘后存在于绝缘纸无定形区,亲水基团与粒子离开平衡位置与水分结合,积聚在油纸界面,在外电场作用下,界面极化更容易建立,极化时间缩短,极化强度增大。

从图 3(e) 可看出,直流电导率 σ_{dc} 随着含水量的增加而逐渐增大,其与含水量之间存在对数函数关系。这是因为水分的增加引入了更多的杂质离子,使绝缘油中带电粒子数目增加,绝缘纸表面传导电流增大,从而增大了油纸绝缘的电导率,使得电导损耗增大。

随着含水量的变化,套管主绝缘修正 Cole-Cole 双弛豫模型分布参数 α_1 、 α_2 并未发生规律性变化,因此,本文选取模型参数 $\Delta\varepsilon_1$ 、 $\Delta\varepsilon_2$ 、 τ_1 、 τ_2 、 σ_{dc} 对油浸式套管含水量进行定量评估。

3.3 考虑温度影响的套管含水量定量评估方法

图 3 为套管主绝缘修正 Cole-Cole 双弛豫模型参数与含水量的关系曲线,通过曲线拟合可得各参数与含水量 C_m 的关系式如表 3 所示。

对表 3 中的拟合公式进行综合,最终得到用于油浸式套管含水量评估的表达式见式(13)。

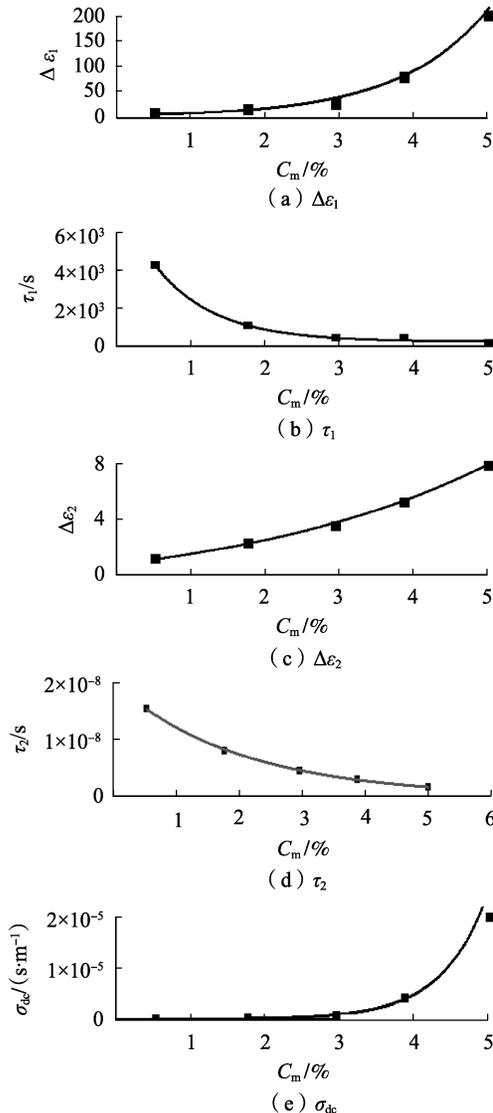


图 3 修正 Cole-Cole 双弛豫模型参数与含水量的关系曲线

Fig.3 Curve of moisture content vs. parameters of modified Cole-Cole double relaxation model

表 3 修正 Cole-Cole 双弛豫模型参数与含水量的映射关系
Table 3 Mapping relationships between parameters of modified Cole-Cole double relaxation model and moisture content

参数	拟合公式	拟合优度
$\Delta\varepsilon_1$	$C_{m1} = \ln(0.696\ 85\Delta\varepsilon_1 - 0.006\ 14)$	0.98
τ_1	$C_{m2} = 5.64\exp(-\tau_1/638.27) + 0.408\ 3$	0.95
$\Delta\varepsilon_2$	$C_{m3} = -7.40\exp(-\Delta\varepsilon_2/4.532) + 6.328$	0.99
τ_2	$C_{m4} = 8.44\exp[-\Delta\tau_1/(3.47\times 10^{-9})] + 0.214$	0.99
σ_{dc}	$C_{m5} = 11.038 + 0.564\ 7\ln\ \sigma_{dc}$	0.99

$$C_m = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 C_{mi} \quad (13)$$

然而,现场测试中的 FDS 测试结果受温度影响较为明显^[7],因此对油浸式套管含水量进行评估时,必须将现场测试的频域介电谱归算到本文参考温度(15 ℃)下,才可采用式(13)进行套管含水量评估。先采用式(14)、(15)将不同温度下的复介电常数转化为交流电导率^[20]:

$$\varepsilon' = \frac{\sigma''}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (14)$$

$$\varepsilon'' = \frac{\sigma'}{2\pi f \varepsilon_0} \quad (15)$$

以 T_{ref} 为参考温度,可以得到温度 T 下各频率点 $f(T)$ 在 T_{ref} 下对应频率点 $f(T_{ref})$ 的计算公式为^[21]:

$$f(T_{ref}) = f(T) \exp\left(\frac{\Delta E(\tau)}{kT} - \frac{\Delta E(\tau)}{kT_{ref}}\right) \quad (16)$$

其中, k 为玻尔兹曼常数, $k = 8.617 \times 10^{-5}$ eV/K; $\Delta E(\tau)$ 为交流电导弛豫过程活化能, $\Delta E(\tau) = 0.981$ eV^[22-23]。根据式(16)可对交流电导频域谱进行 $\lg f$ 方向的平移。根据式(17)、(18),可对交流电导频域谱进行 $\lg \sigma'$ 、 $\lg \sigma''$ 方向的平移。对交流电导频域谱进行平移处理后,再根据式(14)、式(15),将其转换为复介电常数,进而消除温度对油浸式套管主绝缘频域介电谱的影响。

$$\sigma'(f_{ref}, T_{ref}) = \sigma'(f_{ref}, T) \exp\left[\frac{\Delta E(\sigma)}{kT} - \frac{\Delta E(\sigma)}{kT_{ref}}\right] \quad (17)$$

$$\sigma''(f_{ref}, T_{ref}) = \sigma''(f_{ref}, T) \exp\left[\frac{\Delta E(\sigma)}{kT} - \frac{\Delta E(\sigma)}{kT_{ref}}\right] \quad (18)$$

其中, f_{ref} 为实测频域谱折算到参考温度时,原频率点平移到参考温度下对应的频率点; $\Delta E(\sigma)$ 为交流电导活化能, $\Delta E(\sigma) = 1.029$ eV^[24]。

为了验证上述温度归算方法对套管主绝缘频域介电谱的有效性,将含水量为 0.53%、1.78%、2.97% 的套管模型放置在 25 ℃ 的温度箱内进行 FDS 测试,将测试结果归算至 15 ℃ 下,与 3.1 节中的 15 ℃ 环境下的实测数据进行对比,结果如图 4 所示(图 4

(a)纵轴为对数坐标)。由图 4 可知,本文提出的温度归算方法可有效地将不同温度下的套管频域介电谱划归到参考温度下。

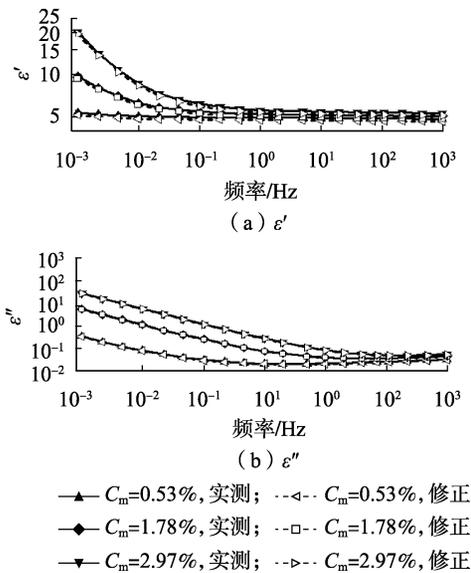


图 4 温度校正曲线

Fig.4 Temperature correction curve

综上所述,可得如图 5 所示的基于频域介电谱的油浸式套管受潮状态评估方法的诊断流程。

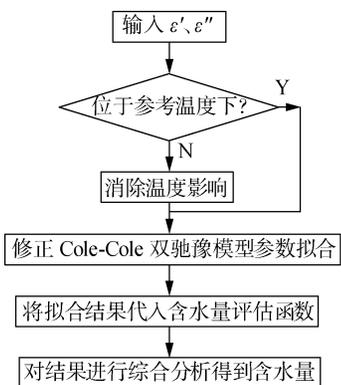


图 5 油浸式套管受潮状态评估方法流程图

Fig.5 Flowchart of assessment of oil-immersed bushing damp state

4 现场应用案例分析

油浸式套管电容芯子结构为油浸绝缘纸,不同电压等级套管的区别在于油浸绝缘纸的径向厚度和纵向长度,而相对复介电常数的频域谱只与材料特性有关,不同电压等级套管绝缘尺寸对频域谱的影响理论上可以忽略。为了验证本文提出的诊断方法应用于实体套管的正确性、现场抗干扰性以及对不同电压等级套管的适用性,分别将西安西电套管厂的 72.5 kV 油浸式套管以及云南元江变电站 220 kV 主变套管作为被测试品进行应用案例验证。

4.1 案例 1:72.5 kV 油纸绝缘套管绝缘状态分析

测试对象为西安西电套管厂生产的 72.5 kV 电

容型油纸绝缘实物套管,测试温度为 25 ℃,施加测试条件与 2.2 节相同,25 ℃ 条件下的实际测试曲线与归算至 15 ℃ 条件下的曲线如图 6 所示。

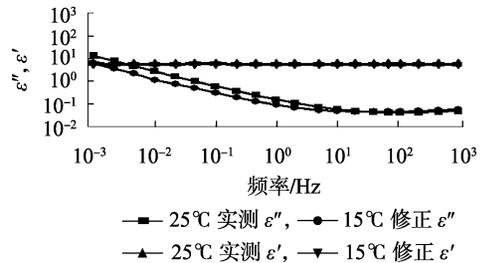


图 6 25 ℃ 条件下复介电常数温度的测试及归算结果

Fig.6 Testing and conversion results of complex permittivity in 25 ℃ condition

根据图 5 拟合修正 Cole-Cole 双弛豫模型参数,得到表 4 所示的特征参数值,将表 4 中各模型参量所对应的含水量评估结果代入式(13)得到该套管的含水量为 2.58%,与厂家出厂测试值 2.4% 的相对误差为 7.7%,可认为 3.3 节提出的含水量评估方法是可行的。

表 4 实物套管频域特征参数及含水量评估结果

Table 4 Frequency-domain feature parameters and water content evaluation results of physical bushing

特征参数	拟合结果	含水量/%
$\Delta\epsilon_1$	15.337	2.47
τ_1	514.037 s	2.37
$\Delta\epsilon_2$	3.287	3.00
τ_2	4.78×10^{-9} s	2.75
σ_{dc}	$2.57 \times 10^{-7} \text{ s} \cdot \text{m}^{-1}$	2.34

4.2 案例 2:220 kV 变压器主变套管绝缘分析

案例 2 的测试是在电磁环境复杂的变电站中进行的,除被测套管变压器离线外,变电站内其他电力设备均处于运行状态。该 220 kV 变压器主变套管于 2015 年 11 月出厂,2016 年投运,属于绝缘状态处于运行初期的新设备,由出厂含水量可知其处于干燥状态。现场变压器离线后,绝缘油温为 24 ℃,测试施加条件同 2.2 节。

现场 220 kV 油浸式套管频域介电谱实测与修正至 15 ℃ 后的结果如图 7 所示,表 5 给出了测试样品的修正 Cole-Cole 双弛豫模型的特征参数与相应的含水量评估结果,将其代入式(13)后得到该套管

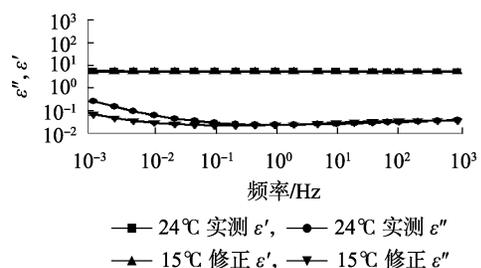


图 7 现场套管 FDS 曲线修正结果

Fig.7 Correction results of field bushing FDS curve

表 5 实物套管频域特征参数及含水量评估结果

Table 5 Frequency-domain feature parameters and water content evaluation results of physical bushing

特征参量	拟合结果	含水量/%
$\Delta\epsilon_1$	2.363 6	0.49
τ_1	4 260.1 s	0.42
$\Delta\epsilon_2$	1.103 4	0.53
τ_2	1.25×10^{-9} s	0.44
σ_{dc}	6.95×10^{-9} s \cdot m $^{-1}$	0.43

的含水量为 0.46%, 结果与试样的运行状态相吻合, 可以判定基于频域介电谱的油浸式套管受潮状态评估方法能有效应用于工程现场, 并且验证了该方法可以适用于不同电压等级的油浸式套管。

5 结论

本文基于频域介电响应法, 针对油浸式套管含水量的定量评估进行了研究, 在实验室内制备了不同含水量的 72.5 kV 油浸式套管模型并进行了 FDS 测试, 拟合修正 Cole-Cole 双弛豫介电弛豫模型并提取了用于水分定量评估的特征参数, 进而得到了含水量定量评估公式, 最后提出了考虑温度影响的油浸式套管含水量定量评估方法。现场案例的测试分析结果表明, 本文所提出的基于频域介电响应法的油浸式套管含水量评估方法是有效的。

参考文献:

- [1] 麦汉源, 聂德鑫, 臧春艳, 等. 基于频率响应分析法的高压套管绝缘检测仿真分析[J]. 高电压技术, 2011, 37(12): 3045-3052. MAI Hanyuan, NIE Dexin, ZANG Chunyan, et al. Simulation analysis of high voltage bushing insulation status detection using frequency response analysis method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12): 3045-3052.
- [2] 田成凤. 变压器电容量式套管电容量及介损的正确测量[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 147-149. TIAN Chengfeng. Properly measure capacitance and condenser-type transformer dielectric loss of bushings[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 147-149.
- [3] 江修波, 张涛, 黄彦婕. 变压器油纸绝缘极化谱的仿真研究[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(2): 31-35. JIANG Xiubo, ZHANG Tao, HUANG Yanjie. Simulation of transformer insulation polarization spectrum[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(2): 31-35.
- [4] SAHA T H. Review of modern diagnostic techniques for assessing insulation condition in aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(5): 903-917.
- [5] 周利军, 李先浪, 吴广宁, 等. 油纸绝缘电介质响应低频弥散的极化机理[J]. 高电压技术, 2013, 39(8): 1873-1880. ZHOU Lijun, LI Xianlang, WU Guangning, et al. Low frequency dispersion mechanism of dielectric response for oil-paper insulation diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(8): 1873-1880.
- [6] LUNDGAARD L E, HANSEN W, LINHJELL D, et al. Aging of oil-impregnated paper in power transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 230-239.
- [7] YEW J H, PRADHAN M K, SAHA T K. Effects of moisture and temperature on the frequency domain spectroscopy analysis of power

- transformer insulation[C]//Proceedings of the IEEE Power Engineering Society General Meeting. Pittsburgh, USA: IEEE, 2008: 1-8.
- [8] 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.
- [9] PRADHAN M H, YEW J H, SAHA T K. Influence of the geometrical parameters of power transformer insulation on the frequency domain spectroscopy measurement[C]//Power and Energy Society General Meeting-Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Bali, Indonesia: IEEE, 2008: 206-210.
- [10] 董明, 刘媛, 任明, 等. 水分含量与分布对油纸绝缘频域介电谱影响的有限元仿真与研究[J]. 高电压技术, 2014, 40(11): 3403-3410. DONG Ming, LIU Yuan, REN Ming, et al. Impacts of moisture content and distribution on frequency domain spectroscopy of oil-paper insulation system by FEM approach[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(11): 3403-3410.
- [11] 周利军, 李先浪, 王东阳, 等. 基于 Havriliak-Negami 介电弛豫模型的油纸绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2016, 32(1): 153-162. ZHOU Lijun, LI Xianlang, WANG Dongyang, et al. Status assessment of oil-paper insulation based on Havriliak-Negami dielectric relaxation model[J]. High Voltage Engineering, 2016, 32(1): 153-162.
- [12] 杨丽君, 高思航, 高竣, 等. 油纸绝缘频域介电谱的修正 Cole-Cole 模型特征参量提取及水分含量评估方法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(10): 26-33. YANG Lijun, GAO Sihang, GAO Jun, et al. Characteristic parameters extracted from modified Cole-Cole model and moisture content assessment methods study on frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(10): 26-33.
- [13] 黎成林, 曹保江, 孙健翔, 等. 基于 FDS 的变压器油浸纸老化程度与水分含量评估方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 217-223. LI Chenglin, CAO Baojiang, SUN Jianxiang, et al. FDS-based assessment of aging degree and moisture content for oil-paper in transformer[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 217-223.
- [14] 杨丽君, 黄加佳, 许佐明, 等. 高压交流套管的油纸绝缘热老化特性及寿命模型研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 144-151. YANG Lijun, HUANG Jiajia, XU Zuoming, et al. Investigation on thermal aging characteristics and lifetime model of oil paper insulation for HV AC bushing[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 144-151.
- [15] 杜振波, 聂德鑫, 张连星, 等. 基于频域介电谱分析的高压套管绝缘状态评估[J]. 高压电器, 2013, 49(11): 6-11. DU Zhenbo, NIE Dexin, ZHANG Lianxing, et al. Insulation evaluation of high voltage bushing based on frequency domain spectroscopy analysis[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(11): 6-11.
- [16] 姚森敬, 田杰, 汤明杰, 等. 基于频域介电谱法的变压器油纸绝缘套管受潮状况分析[J]. 南方电网技术, 2014, 8(4): 52-56. YAO Senjing, TIAN Jie, TANG Mingjie, et al. Study on moisture assessment of oil paper insulated bushings based on frequency domain spectrum[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(4): 52-56.
- [17] 殷之文. 电介质物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2006: 57-63.

- [18] 赵孔双. 介电谱方法及应用[M]. 北京:化学工业出版社,2008:95-125.
- [19] 刘其昶. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京:机械工业出版社,1988:131-137.
- [20] BADICU L V, GORGAN B, DUMITRAN L M, et al. Assessment of transformer mineral oil condition based on DC and AV conductivity [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5):1544-1551.
- [21] 王东阳, 周利军, 朱少波, 等. 不同温度油隙频域介电谱的归算方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(23):6586-6592.
WANG Dongyang, ZHOU Lijun, ZHU Shaobo, et al. Method of normalizing the frequency domain dielectric spectrum of oil gap tested in different temperatures [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23):6586-6592.
- [22] ŻUKOWSKI P, KONSTUNOWICZ T N, KIERCZYŃSKI K, et al. Permittivity of a composite of cellulose, mineral oil, and water nanoparticles: theoretical assumptions [J]. Cellulose, 2015, 23(1):175-183.
- [23] GAO J, YANG L, WANG Y, et al. Effect of moisture and thermal degradation on the activation energy of oil-paper insulation in frequency domain spectroscopy measurement [J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2016, 10(9):2042-2049.
- [24] ŻUKOWSKI P, KOŁTUNOWICZ T N, KIERCZYŃSKI K, et al. An analysis of AC conductivity in moist oil-impregnated insulation pressboard [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(4):2156-2164.

作者简介:



周利军

周利军(1978—),男,浙江萧山人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要从事电气设备状态检测与故障诊断方面的研究(E-mail:zhoulijun@swjtu.cn);

刘伟迪(1992—),男,河北沧州人,硕士研究生,主要从事电气设备状态检测与故障诊断方面的研究。

Evaluation of oil-immersed bushing damp state based on frequency-domain dielectric spectroscopy

ZHOU Lijun¹, LIU Weidi¹, WANG Dongyang¹, PAN Gang¹, LI Huize¹, XU Xiaowei²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China;

2. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: In order to quantitatively evaluate the damp state of oil-immersed bushing main insulation, the Cole-Cole double relaxation model considering DC conductivity is built. By testing 72.5 kV oil-immersed bushing model with 0.53%, 1.78%, 2.97%, 1.78% and 5.03% moisture contents prepared in the laboratory, the corresponding frequency-domain dielectric spectroscopy is obtained. The frequency-domain dielectric spectroscopy is fitted and parsed by the Cole-Cole double relaxation model, then the characteristic parameters representing the moisture content of oil-immersed bushing insulation are extracted and the assessment formula is fitted. Considering the influence of temperature on the field testing results, the oil-immersed bushing damp state assessment method suitable for the field is proposed. Results of case analysis verify the effectiveness of the proposed method.

Key words: power transformers; bushing; insulation; frequency-domain dielectric spectroscopy; Cole-Cole model; moisture content; quantitative assessment

(上接第133页 continued from page 133)

Characteristic calculation of magnetic-valve controllable reactor based on inverse Jiles-Atherton model

ZHANG Huiying^{1,2}, TIAN Mingxing^{1,2}, CHAI Zuoshi^{1,2}, WANG Tiange^{1,2}

(1. School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. Gansu Province Engineering Laboratory for Rail Transit Electrical Automation, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In the calculation and analysis of the characteristics of the MCR (Magnetic-valve Controllable Reactor), it is necessary to consider the characteristics of both AC and DC excitation and different magnetization states of the core magnetic circuit. Firstly, an equivalent magnetization characteristic model of MCR based on inverse Jiles-Atherton model is proposed. This model considers the effects of hysteresis, DC magnetic bias and small section magnetic-valve on the magnetization characteristics, and it is suitable for MCR with different structural parameters. Subsequently, the calculating formulas and methods for current characteristics, control characteristics and loss characteristics of MCR are proposed based on the equivalent magnetization model. Finally, the theoretical calculation and experimental measurement for a MCR prototype are carried out, and the results are compared with those based on the ideal small slope model. Test results indicate that the proposed MCR equivalent magnetization characteristic model and its current characteristic, control characteristic and loss characteristic calculation method are correct and effective, which provides a certain reference and guidance for engineering design and calculation of MCR.

Key words: magnetic-valve controllable reactor; inverse Jiles-Atherton model; magnetization characteristic; calculation