

基于频域介电谱的环氧树脂浸渍皱纹纸绝缘受潮状态评估

江 阳¹, 赵 贺², 宋一凡², 孙永文³

(1. 国网北京市电力公司, 北京 100031; 2. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075;
3. 北京开元浩海科技发展有限公司, 北京 100161)

摘 要:环氧树脂浸渍皱纹纸(ERICP)绝缘材料被广泛应用于电力设备绝缘,受潮是影响其绝缘状态的重要原因。本文将频域介电谱(FDS)技术用于材料绝缘状态的评估,首先制备不同含水量的ERICP样片并开展FDS测试;然后根据FDS频谱曲线,分析FDS特征参数随含水量的变化规律;最后引入介电模量谱和模量因子,提出ERICP绝缘状态评估方法。结果表明:含水量的变化影响FDS曲线整体变化规律;介电模量能够有效抑制直流电导的影响从而表征内部弛豫过程;ERICP样片的介电模量谱在低频范围内出现了明显的弛豫峰,弛豫峰的特征频率随含水量的增加而升高;介电模量虚部的积分面积可以作为表征ERICP绝缘的特征参量,模量因子与含水量的关系同指数函数具有0.997 5的拟合优度。

关键词:环氧树脂浸渍皱纹纸;含水量;频域介电谱;介电模量;模量因子

中图分类号: TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.07.010

Moisture condition evaluation of epoxy resin impregnated crepe paper based on frequency domain spectroscopy

JIANG Yang¹, ZHAO He², SONG Yifan², SUN Yongwen³

(1. State Grid Beijing Electric Power Company, Beijing 100031, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China; 3. Beijing Crehoi Sci & Thch Co., Ltd., Beijing 100161, China)

Abstract: Epoxy resin impregnated crepe paper (ERICP) insulating materials are widely used in power equipment insulation, and moisture is an important reason affecting their insulation state. In this paper, the frequency domain spectroscopy (FDS) technology was used for insulation condition evaluation. Firstly, ERICP samples with different moisture content were prepared and carried out FDS tests. Then, according to the FDS spectrum curves, the variation law of FDS characteristic parameters with moisture content was analyzed. Finally, the dielectric modulus spectrum and modulus factor were introduced, and the insulation condition evaluation method of ERICP was proposed. The results show that the change of moisture content affects the overall change law of FDS curves. The dielectric modulus can effectively suppress the influence of DC conductivity to characterize the internal relaxation process. The dielectric modulus spectrum of ERICP samples has obvious relaxation peak in the low-frequency range, and the characteristic frequency of relaxation peak increases with the increase of moisture content. The integral area of the imaginary part of dielectric modulus can be used as a characteristic parameter to characterize the insulation condition of ERICP. The relationship between the modulus factor and moisture content has 0.997 5 of goodness of fit with the exponential function.

Key words: epoxy resin impregnated crepe paper; moisture content; frequency domain spectroscopy; dielectric modulus; modulus factor

0 引言

环氧树脂浸渍皱纹纸(epoxy resin impregnated crepe paper, ERICP)复合材料具有介电性能优异,耐腐蚀性强、机械强度高、可塑性强、防爆阻燃等特点,在电力设备绝缘中得到广泛应用^[1]。与传统的

油纸绝缘设备不同,以环氧树脂为代表的干式绝缘设备不存在漏油、产气、爆炸等绝缘失效带来的二次破坏,因此干式绝缘设备在干式变压器、干式套管、复合绝缘子等设备绝缘中得到越来越广泛的应用^[2]。其中特高压干式套管的电容芯子由皱纹纸和铝箔交替卷纸在真空条件下进行干燥,然后经环氧树脂浇注、固化后形成,ERICP是其主要的绝缘材料^[3]。

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077005);国网北京市电力公司科学技术项目(52022320006D)

近年来,介电响应法作为一种新型的绝缘状态无损诊断方法,被广泛应用于高压套管绝缘性能检测,其主要包括时域回复电压测量(recovery voltage measurement, RVM)^[4]、极化去极化电流测量(polarization/depolarization current, PDC)^[5]以及频域介电谱测量(frequency-domain dielectric spectroscopy, FDS)^[6]。其中FDS现场测试曲线携带信息丰富、测量频带宽、抗干扰能力强,逐渐成为受潮、老化等绝缘状态指标的重要评估手段。

目前,利用FDS法研究受潮对油纸绝缘设备的影响已取得显著成果。张大宁等^[6]研究了油纸绝缘在不同受潮类型时的FDS特性参数变化规律,结果表明界面极化损耗对FDS曲线变化贡献最大,且不均匀受潮程度越大,曲线波动越大,并评估了水分分布不均匀对油纸绝缘的影响;杨峰等^[7]在不同温度、不同受潮程度下对油纸电容芯子进行FDS测试,并引入扩展德拜模型,获得受潮状态定量评估方法;丁宁等^[8]研究不同含水量的环氧树脂FDS特性,提出了一种分段拟合的方法来减小高低频活化能的影响,并提取0.01 Hz作为受潮诊断的特征频率;郝建等^[9]采用修正Cole-Cole模型分析受潮和老化协同效应对油纸绝缘频域谱的影响,提出了一种基于介电模量分析的绝缘性能评估方法;张涛等^[10]利用分数阶模型对油纸绝缘受潮频域谱进行参数辨识,提出表征受潮的特征参量并与含水量进行量化研究得出含水量评估方法。

针对纯环氧树脂材料的研究已有阶段性成果,谢伟等^[11]基于环氧树脂材料开展热氧老化特性研究,得出 $\tan\delta$ 、 ϵ_r 呈分段式变化趋势,可用于评估环氧树脂材料的绝缘状态,且热质量损失率的变化规律可用于预测材料的使用寿命;张施令等^[12]测量了环氧树脂频谱和温谱曲线,用H-N模型对频谱拟合获得特征参数,其具有显著的温度依赖性,符合Arrhenius公式;宁鑫等^[13]将皱纹纸引入环氧树脂材料,提出基于相对介电常数一阶导数的改进差分优化算法,分析其介电弛豫过程,结果表明皱纹纸的引入使环氧树脂材料的各项性能均发生显著改变。但对环氧树脂复合材料,尤其是用于高压干式套管的ERICP复合材料研究甚少,而套管主绝缘受潮将严重影响电力网络的平稳、安全运行,亟需开展基于FDS测量的ERICP复合材料绝缘性能变化规律研究。因此,本文借鉴上述基于FDS法的绝缘性能研究经验,从真型高压套管上切取ERICP绝缘材料,制备不同含水量的试验样品,然后深入研究受潮对ERICP绝缘样品介电响应特性的影响,分析

FDS特征参数随含水量的变化规律,最后引入介电模量的概念,提出ERICP绝缘状态评估方法。

1 试验与介电分析理论

1.1 受潮试验布置

受潮试验采用的ERICP绝缘样品由国内套管厂按特高压干式套管绝缘体实际配比制成,然后径向切割加工成尺寸为8 cm×8 cm×1 mm的样片。试验开始前,先将样片放入干燥箱内,在100℃环境下干燥12 h至质量不再减少,通过高精度电子天平测量样片的初始质量 m_0 ,之后将样片浸没水中12 h,取出自然晾干至样片表面没有水层并称量 m ,认为此时的质量为绝缘样品最高含水量对应的质量。再进行不同程度的干燥处理得到不同含水量的样品。根据式(1)计算样片的含水量。

$$c = \frac{m - m_0}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

在实验室搭建如图1所示的FDS测试平台。将样品放入三电极测量系统中并夹紧,保护电极可有效地消除边缘效应。将三电极结构放置于金属容器内,由于较长时间暴露在空气中的ERICP样品很容易二次受潮而影响其介电性能,因此试验中将测试用金属容器放置于温湿度控制箱内,同时将测量线引至温湿度控制箱外部与FDS测量设备相连。未消除环境温湿度对试验结果造成较大影响,因此试验时设置温度为25℃、湿度为30%,通过温湿度传感器控制箱内的温湿度。FDS测量前后各测1次样品质量,取平均值作为样品的 m 值,最终获得含水量分别为0.31%、0.56%、0.65%、1.02%、1.36%、1.85%的ERICP样片。FDS测试设备选用奥地利Omicron公司开发的DIRANA介电响应分析仪,激励设置为有效值为200 V的交流变频,频率范围设置为1 mHz~1 kHz。实验设备及三电极测试系统接线简图如图1所示。

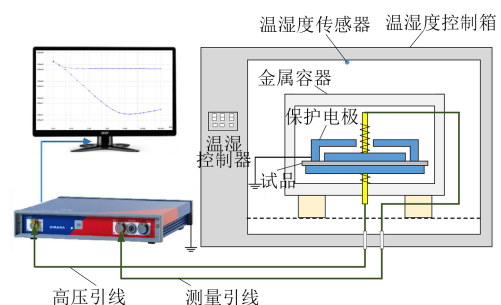


图1 实验设备及三电极测试系统接线简图

Fig.1 Wiring diagram of experimental equipment and three electrode test system

1.2 电介质理论基础

当电介质施加激励时,流过其内部的电流主要由电导电流和位移电流组成,其频域介电响应如式(2)~(3)所示^[14]。

$$\mathbf{J}(\omega, T) = \sigma_0 \mathbf{E}(\omega) + i\omega \mathbf{D}(\omega, T) \quad (2)$$

$$\mathbf{J}(\omega, T) = \left\{ \sigma_0(T) + i\omega \varepsilon_0 [1 + \chi'(\omega, T) - i\chi''(\omega, T)] \right\} \mathbf{E}(\omega) \quad (3)$$

$$\mathbf{E}(\omega) = i\omega \varepsilon_0 [C'(\omega, T) + C''(\omega, T)] \mathbf{E}(\omega)$$

式(2)~(3)中: $C'(\omega, T)$ 和 $C''(\omega, T)$ 分别为电容实部和虚部; $\chi'(\omega, T)$ 和 $\chi''(\omega, T)$ 分别为介质极化率实部和虚部; ω 为角频率, $\omega=2\pi f$; ε_0 为真空介电常数; σ_0 为样品直流电导率; $\mathbf{D}(\omega, T)$ 为电位移; $\mathbf{E}(\omega)$ 为电场强度; $\mathbf{J}(\omega, T)$ 为电流密度。

在电介质施加交变电场的情况下,当频率相对较低时,自由电荷会在电极周围积聚,大量的载流子将吸附在电极表面。电极表面累积电荷产生的感应电场会影响电场中原始载流子的运动^[15]。在完成同样的动作时,使自由电荷产生更多的能量损失。电极附近的电荷积累,通常称为电极极化(electrode polarization, EP),这种EP效应掩盖了弛豫过程,使弛豫行为很难显现^[16]。

图2为介电材料的频率响应特性。从图2可以看出,电介质内部的自由电荷在电场作用下发生定向移动,电解质内部流过的电流包括电导电流和极化电流。由于EP效应和电导行为的影响,低频区产生的被测电流主要由电导电流形成。换句话说,低频区的主要介电响应信息主要表现为电导,而不是弛豫极化^[17-20]。若忽略电导电流对测试结果的贡献,则可得到 $\varepsilon^*(\omega)$ 的实部和虚部如式(4)所示。

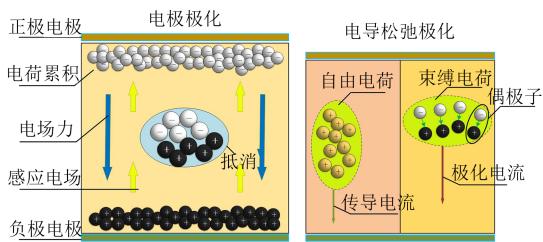


图2 介电材料的频率响应特性

Fig.2 Frequency response characteristics of dielectric materials

$$\begin{cases} \varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (\omega\tau)^2} \\ \varepsilon''(\omega) = \frac{(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \cdot \omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)中: ε_s 为低频下的介电常数; τ 为弛豫时间常数; ε_∞ 为光频相对介电常数; $\varepsilon'(\omega)$ 和 $\varepsilon''(\omega)$ 分别表示复介电常数实部和虚部。

1.3 介电模量理论分析

电极极化导致的介电常数高,可能会掩盖介电弛豫机制。在这种情况下,介电模量对于分析介电弛豫机制非常有用。介电模量 M^* 是复相对介电常数 ε^* 的倒数^[21],可定义为式(5)。

$$M^* = \frac{1}{\varepsilon^*} = \frac{1}{\varepsilon' - j\varepsilon''} = \frac{\varepsilon'}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} + j \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'^2 + \varepsilon''^2} = M' + jM'' \quad (5)$$

式(5)中: ε' 和 ε'' 分别代表复相对介电常数的实部和虚部; M' 和 M'' 分别代表介电模量的实部和虚部。且式(5)满足 $\varepsilon^* = C^*/C_0$, C_0 为几何电容,本模型中 $C_0 = 8.85 \times 10^{-11}$ F。

Cole-Cole方程是描述电介质材料弛豫行为的经典模型之一,如式(6)所示^[22-26]。

$$\varepsilon^* = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)^\beta} \quad (6)$$

式(6)中: β 为系数,与材料的尺寸及结构相关,宏观上在FDS谱图中与弛豫峰的宽度直接相关,且 $0 < \beta < 1$ 。

Cole-Cole模型在频率刻度上表现为在弛豫特征频率处出现极大值的一条曲线^[27]。若绝缘材料符合Cole-Cole型弛豫,根据式(5)和式(6)可推导出介电模量的表达式如式(7)所示。

$$\begin{aligned} M^* &= \frac{1}{\varepsilon^*} = \frac{1}{\varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{1 + (i\omega\tau)^\beta}} = \frac{1}{\varepsilon_\infty} \cdot \frac{1}{1 + \frac{\varepsilon_s/\varepsilon_\infty - 1}{1 + (i\omega\tau)^\beta}} \\ &= \frac{1}{\varepsilon_\infty} \cdot \left(\frac{1 + \frac{\varepsilon_s/\varepsilon_\infty - 1}{1 + (i\omega\tau)^\beta} - \frac{\varepsilon_s/\varepsilon_\infty - 1}{1 + (i\omega\tau)^\beta}}{1 + \frac{\varepsilon_s/\varepsilon_\infty - 1}{1 + (i\omega\tau)^\beta}} \right) \\ &= \frac{1}{\varepsilon_\infty} \cdot \left(1 - \frac{\varepsilon_s/\varepsilon_\infty - 1}{1 + (i\omega\tau)^\beta + \varepsilon_s/\varepsilon_\infty - 1} \right) \\ &= \frac{1}{\varepsilon_\infty} - \frac{1}{1 + (i\omega\tau)^\beta} \cdot \frac{1}{\varepsilon_s} = M_\infty + \frac{M_s - M_\infty}{1 + (i\omega\tau_M')^\beta} \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)中: $M_\infty = 1/\varepsilon_\infty$; $M_s = 1/\varepsilon_s$; $\tau_M' = \tau \cdot (\varepsilon_\infty/\varepsilon_s)^{1/\beta}$ 。将它们代入式(4),得到 $M^*(\omega)$ 的实部和虚部表达式如式(8)所示。

$$\begin{cases} M'(\omega) = M_\infty + \frac{M_s - M_\infty}{1 + (\omega\tau_M')^2} \\ M''(\omega) = \frac{(M_s - M_\infty) \cdot \omega\tau_M'}{1 + (\omega\tau_M')^2} \end{cases} \quad (8)$$

$\varepsilon^*(\omega)$ 可视为电导、电极极化和弛豫极化贡献的叠加。当计算 $M^*(\omega)$ 时,式(7)所示的反演操作使电导和电极极化贡献值迅速减小,而弛豫极化贡献值

迅速增大。电导和电极极化的贡献最初在 $\epsilon^*(\omega)$ 光谱中保持较大幅度,当转换为 $M^*(\omega)$ 光谱时,其幅度迅速减小,而在 $M^*(\omega)$ 光谱中弛豫极化贡献的幅度被放大。即 $M^*(\omega)$ 会放大弛豫信息,并抑制电导和电极极化对频率响应的贡献^[28]。

通过消除式(8)中的 $\omega\tau_M$, 可以获得 Cole-Cole 圆的表达式如式(9)所示。

$$\left[M'(\omega) - \frac{M_s + M_\infty}{2} \right]^2 + M''(\omega)^2 = \frac{(M_s - M_\infty)^2}{4} \quad (9)$$

从式(7)可知,复介电模量 M^* 谱图中也会出现以特征频率为中心的峰值,即其与 Cole-Cole 方程形式相同。由于 $\epsilon_s > \epsilon_\infty$, 则 τ'_M 总小于 τ , 因此介电模量谱图中指代电介质的弛豫行为相比 FDS 谱图,其特征频率将向高频移动,且其弛豫峰形状不变并由 β 参数决定。

2 结果与讨论

2.1 样片不同受潮程度的 FDS 结果

不同含水量的 ERICP 样片的 FDS 测试结果如图 3 所示。从图 3 可以看出,介质损耗因数和复介电常数曲线形状受水分的影响较大。样片材料在轻度受潮 ($c < 1.02\%$) 和重度受潮 ($c \geq 1.02\%$) 时曲线变化规律存在较大差异。

从图 3(a)可以看出,当 ERICP 样片处于轻度受潮时,复介电常数实部受水含量的影响较小,在频率为 $0.1 \sim 10^3$ Hz 的高频段基本不变,在频率为 $10^{-3} \sim 0.1$ Hz 的低频段随着含水量的增加而缓慢增大,且 ϵ' 随着频率的增大逐渐减小;当样片处于重度受潮时, ϵ' 频域谱在整个频段均受含水量的影响较大, ϵ' 随着含水量的增加显著增大,且 ϵ' 频域谱对含水量变化的反应在越靠近低频段表现得越为灵敏。复介电常数虚部表示绝缘材料的损耗部分,虚部的变化规律与介质损耗因数的变化规律一致,如图 3(b)和(c)所示,在整个频段内, ϵ'' 和 $\tan\delta$ 随含水量的增加而增大,当样片处于轻度受潮时,弛豫峰在测试频段内无法显现。随着含水量的增加弛豫峰逐渐显现,弛豫峰出现的特征频率因含水量的不同存在较大差异,且弛豫峰随着含水量的增加整体向高频方向移动。同时由曲线变化规律可以推断,在 $f \leq 10^{-3}$ Hz 的更低频段,轻度受潮的样片出现与 $10^{-3} \sim 1$ Hz 频段内轻度受潮样片相似的规律,当样片干燥到一定程度时,其与初始状态曲线接近。

该现象主要是因为水分子是强极性分子,其含量增加,使得环氧树脂与皱纹纸的界面接触更充分,显著加强了 ERICP 样片的偶极子转向极化过

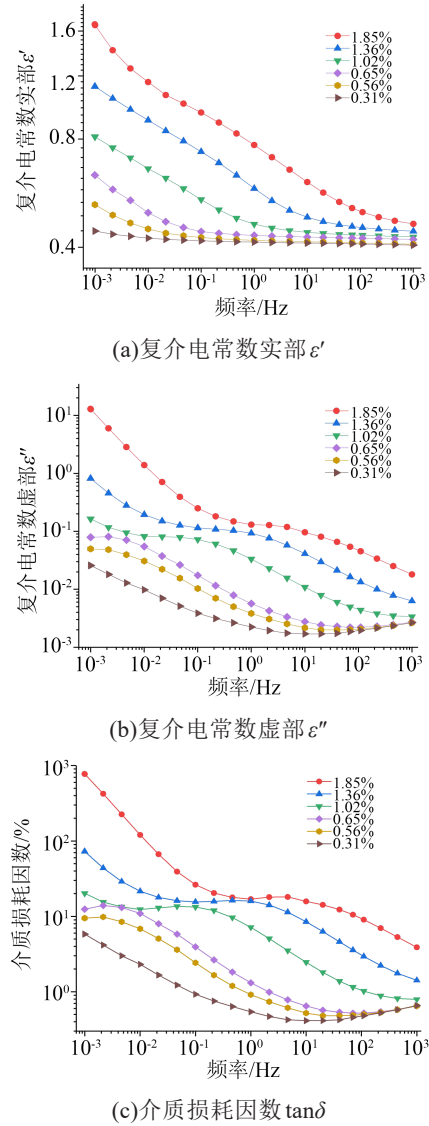


图3 不同受潮程度 ERICP 样片频域介电谱测试结果
Fig.3 Frequency domain spectrum test results of ERICP samples with different moisture content

程,水分子与 ERICP 绝缘材料反应后产生大量离子,降低了 ERICP 复合材料界面的黏度,导致极化和电导过程加强,同时水会在 ERICP 复合材料之间形成水膜,进而加强界面极化,缩短了介电响应的持续时间,导致弛豫峰出现的频率随含水量的增加逐渐增大。

国外学者常采用频率为 10^{-4} Hz 时的电容与工频电容的比值作为电容比^[26]。研究表明,绝缘状态随电容比减小逐渐变好^[27]。但频率为 10^{-4} Hz 的试验测试需要时间较长,不便于现场评估,因此本文分别采用频率为 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} Hz 时的电容与工频电容的比值作为电容比进行受潮状态评估。表 1 给出了不同含水量下 ERICP 样片的电容比。从表 1 可以看出,随着含水量的增加,ERICP 样片的电容比

明显增大,其中频率为 10^{-3} Hz时的电容与工频电容的比值随含水量的增加增幅最大,因此可选择频率为 10^{-3} Hz的电容与工频电容的比值作为电容比,对于反映受潮的程度更加灵敏。

表1 不同含水量下ERICP样片的电容比

Tab.1 Capacitance ratio of water content for ERICP samples

含水量/%	$C_{0.1\text{ Hz}}/C_{50\text{ Hz}}$	$C_{0.01\text{ Hz}}/C_{50\text{ Hz}}$	$C_{0.001\text{ Hz}}/C_{50\text{ Hz}}$
1.85	1.808	2.143	3.169
1.36	1.605	1.964	2.438
1.02	1.253	1.527	1.804
0.65	1.043	1.125	1.419
0.56	1.036	1.091	1.278
0.31	1.017	1.038	1.083

2.2 样品不同受潮程度的介电模量谱

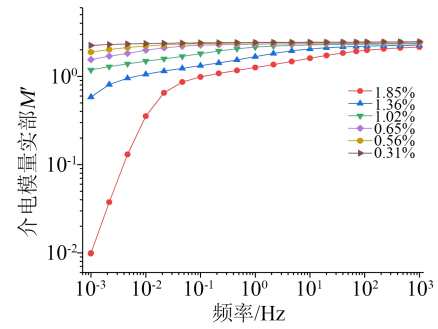
如前文所述, $M^*(\omega)$ 的值可以视为 $\varepsilon^*(\omega)$ 的倒数,因此 $M^*(\omega)$ 是一种携带由 $\varepsilon^*(\omega)$ 导出的频率响应信息的频域谱,可用于研究交变电场下电介质材料的弛豫极化信息。ERICP样片的受潮程度逐渐增加,使得整个频段的FDS曲线发生显著变化,当测量频率足够低时,可以完全建立弛豫极化行为和电导行为,在这种情况下, $\tan\delta$ 、 $\varepsilon'(\omega)$ 和 $\varepsilon''(\omega)$ 的值相当,这种普遍规律也称为介电材料的频率依赖性^[21]。

显然,在较低频段,介电弛豫现象引起的损耗明显受电导损耗的支配。因此,利用式(8)计算介电模量特性,即 $M'(\omega)$ 和 $M''(\omega)$,其可降低低频电导损耗的影响,得到不同含水量ERICP样片的介电模量实部和虚部的变化曲线如图4所示。

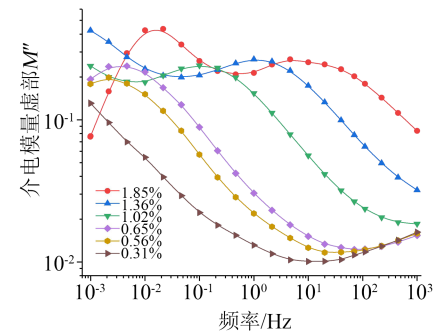
从式(9)可知,复介电模量 M^* 的谱图会出现以特征频率为中心的峰值。因此相比FDS谱图, M^* 谱图中指代弛豫行为部分将向高频移动,且弛豫峰形状不变。

根据FDS的测试结果很难准确评估ERICP样片的受潮状态。因此本文利用介电模量谱深入分析能表征材料含水量的新特征参量。对比图4(a)与图3(a)可知, $\varepsilon'-f$ 曲线全频段随频率的增加呈下降趋势,而 $M'-f$ 曲线在高频段 M' 几乎与频率轴平行,其全频段随频率的增加呈上升趋势,同时,介电模量实部随着含水量的增加逐渐向高频方向移动。对比图4(b)与图3(b)可知,两种谱图在低频段出现较大差异,当重度受潮时,不同含水量的ERICP样片的 $\varepsilon''-f$ 频谱随频率的增加整体呈下降趋势, $M''-f$ 频谱则出现明显的“弛豫峰”,弛豫峰出现的频率称为“弛豫峰频率”,弛豫峰是反映电介质极化过程损耗的一个重要参数。因此介电模量虚部能较好地表征ERICP样片的弛豫极化过程,随着含水量的增

加,介电模量虚部的“弛豫峰”逐渐向高频方向移动。FDS谱图和 M^* 谱图产生差异的原因在于低频范围内电导损耗和极化损耗占据主导作用,电导损耗随频率的增加而降低,使FDS谱图呈现下降趋势,而 M^* 谱图最大程度的克服了电导损耗和极化损耗的影响,从而能有效地表征ERICP样片的弛豫过程和变化机理。



(a) 介电模量实部 M'



(b) 介电模量虚部 M''

图4 不同受潮程度ERICP样片的介电模量

Fig.4 Dielectric modulus of ERICP samples with different moisture content

$M''-f$ 谱图的“弛豫峰”逐渐向高频方向移动,是因为含水量增加后弛豫时间改变,而幅值基本保持不变。弛豫峰的特征频率与ERICP样品含水量的对应关系如图5所示。

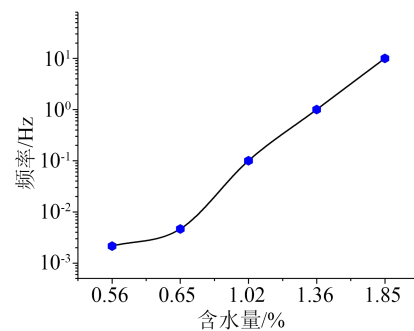


图5 不同含水量ERICP样片的弛豫峰特征频率
Fig.5 Characteristic frequency of relaxation peak of ERICP samples with different moisture content

3 评估 ERICP 样片受潮程度的新方法

从图 3(b)可以明显看出,对于 $\varepsilon''(\omega)$,“损耗峰值”并不总是出现在响应曲线上,这使得很难通过“损耗峰值”提取相关松弛信息。相反,在 $M''(\omega)$ 的每条响应曲线上会产生一个明显的“损耗峰值”。因此, $M^*(\omega)$ 的应用将促进特征参数的提取和介电行为的研究。

由上述分析可知,介电模量虚部可以有效表征 ERICP 样片的弛豫极化过程。因此本文选择研究介电模量虚部与含水量的对应关系,通过对介电模量虚部积分得到新的特征参数,定义为模量因子 $A_{c\%}$,建立有效的函数模型进行含水量评估。在 $A_{c\%}$ 计算之前,先将离散的数据点用光滑曲线连接,然后将光滑曲线作为函数进行定积分,如式(10)所示。

$$A_{c\%} = \int_{10^{-3}}^{10^1} M''(f) df \quad (10)$$

ERICP 绝缘材料的含水量 $mc\%$ 与模量因子实测值与拟合值如图 6 所示,拟合方程如式(11)所示。从图 6 可以得出,拟合优度为 0.997 5。拟合结果表明 $A_{c\%}$ 与 $c\%$ 呈指数函数关系,可用于 ERICP 绝缘材料的受潮状态评估。

$$A_{c\%} = 22.83 \times e^{-2.927 \times c\%} + 2.769 \times e^{2.047 \times c\%} \quad (11)$$

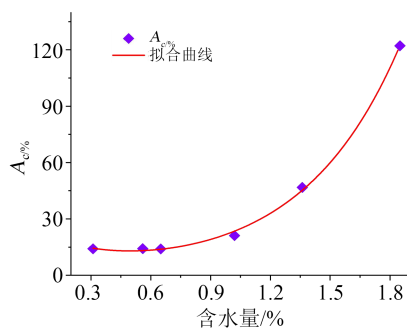


图 6 $c\%$ 与 $A_{c\%}$ 实测值与拟合曲线图

Fig.6 Measured value and fitting curve of $c\%$ and $A_{c\%}$

4 结论

(1)当 ERICP 样片处于轻度受潮时, ε'' 频域谱受含水量的影响较小;当 ERICP 样片重度受潮时, ε'' 频域谱在整个频段均受含水量的影响,且随着含水量的增加,弛豫峰整体向高频方向移动。

(2)频率分别为 10^{-3} 、 10^{-2} 、 10^{-1} Hz 时, ERICP 样片的电容比随着含水量的增加明显增大,选择频率为 10^{-3} Hz 时的电容比便于受潮状态评估。

(3)在低频范围内, ERICP 样片的电导极化会淹没其他弛豫极化过程,介电模量能够有效地抑制

直流电导的影响从而有效表征介电材料的内部弛豫过程;在低频范围内,与 FDS 谱图不同的是介电模量谱图出现了明显的弛豫峰,且弛豫峰的特征频率随 ERICP 样片含水量的增加而升高。

(4)介电模量虚部的积分面积可以作为表征 ERICP 样片的特征参数模量因子,模量因子与含水量的关系同指数函数具有 0.997 5 的拟合优度,可用于 ERICP 绝缘材料受潮状态的评估。

参考文献:

- [1] 王黎明, 聂章翔, 赵晨龙, 等. 水分在环氧树脂复合绝缘子护套中的渗透特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 173-180.
- [2] ZHANG H L, LIU P, ZHANG X Y, et al. Dielectric spectra of epoxy resin impregnated crepe paper composites in different humidity[C]//2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chengdu, China: IEEE, 2016.
- [3] SAHA T K, YAO Z T. Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service-aged transformers[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 128-135.
- [4] FARAHANI M, BORSI H, GOCKENBACH E. Dielectric response studies on insulating system of high voltage rotating machines[J]. IEEE Transaction on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(1): 383-393.
- [5] 杨丽君, 齐超亮, 邓帮飞, 等. 采用修正 Cole-Cole 模型提取油纸绝缘频域介电谱的特征参量方法[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 310-317.
- [6] 张大宁, 白帆, 牛朝滨, 等. 不同受潮类型下油纸绝缘套管的频域介电谱特性[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(16): 4942-4950, 4998.
- [7] 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.
- [8] 丁宁, 穆海宝, 丁清鹏, 等. 基于频域介电谱的环氧树脂受潮评估及影响因素[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 706-715.
- [9] HAO J, DAI X Z, GAO J, et al. Synergistic enhancement effect of moisture and aging on frequency dielectric response of oil-immersed cellulose insulation and its degree of polymerization evaluation using dielectric modulus[J]. Cellulose, 2021, 28(1): 1-17.
- [10] 张涛, 江世杰, 张宁, 等. 基于介电模量谱和分数阶模型的植物油纸绝缘状态评估[J]. 高电压技术, 2022, 48(4): 1452-1461.
- [11] 谢伟, 杨征, 程显, 等. 环氧树脂材料热老化特性研究[J]. 电工技术学报, 2020, 35(20): 4397-4404.
- [12] 张施令, 宁鑫, 彭宗仁. 高压电力设备用环氧树脂材料绝缘性能研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(1): 60-65.
- [13] 宁鑫, 彭宗仁, 冯骅, 等. 特高压直流干式套管用环氧及环氧/皱纹纸复合材料介电特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 995-1001.
- [14] LI Z, OKAMOTO K, OHKI Y, et al. Effects of nano-filler addition on partial discharge resistance and dielectric breakdown strength of micro- Al_2O_3 epoxy composite[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(3): 653-661.
- [15] 陈铭, 刘轩东, 李原, 等. 采用频域介电谱法的高压干式套管屏

- 间局部绝缘劣化诊断[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2359-2365.
- [16] SONERUD B, BENGTTSSON T, BLENNOW J, et al. Dielectric response measurements utilizing semi-square voltage waveforms [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 920-926.
- [17] 高波, 郝长金, 尹小兵, 等. 温度对发电机主绝缘频域介电响应的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(3): 915-923.
- [18] 王黎明, 聂章翔, 赵晨龙, 等. 水分在环氧树脂复合绝缘子护套中的渗透特性[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 173-180.
- [19] 王有元, 刘玉, 王施又, 等. 电热老化对干式变压器中环氧树脂特性的影响[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3906-3916.
- [20] 王有元, 王施又, 黄炎光, 等. 干式变压器环氧树脂热老化特性研究[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 187-194.
- [21] JONSCHER A K. Low-frequency dispersion in carrier dominated dielectrics[J]. Philosophical Magazine Part B, 1978, 38(6): 587-601.
- [22] 吴广宁, 钟鑫, 包健康. 温度对油纸绝缘介电频谱特性的影响[J]. 高电压技术, 2015, 41(12): 4081-4088.
- [23] 张宏亮, 张丝钰, 刘鹏, 等. 高温下纳米氧化石墨烯/环氧树脂复合材料的载流子特性[J]. 高电压技术, 2018, 44(12): 3814-3823.
- [24] 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.
- [25] 张大宁, 梁兆杰, 李璇, 等. 套管油纸绝缘受潮与老化的介电响应非线性特性和辨识方法[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(6): 18-30.
- [26] 丁宁, 穆海宝, 梁兆杰, 等. 水分对干式套管环氧浸渍纸材料介电特性的影响[J]. 电工技术学报, 2022, 37(11): 2716-2724.
- [27] CHATTERJEE S, PRADHAN A K, DALAI S, et al. Reducing frequency domain spectroscopy measurement time for condition monitoring of transformer oil-paper insulation using non-sinusoidal excitations[J]. IET Science, Measurement and Technology, 2017, 11(2): 204.
- [28] 陈晓琳, 符小桃, 吴乾东, 等. 基于频域介电谱的油纸绝缘套管局部受潮诊断研究[J]. 电力工程技术, 2022, 41(2): 149-155.

收稿日期: 2022-07-20 修回日期: 2022-10-08

作者简介: 江阳(1972-), 男(汉族), 山东威海人, 高级工程师, 主要从事智能配用电技术的研究。