

变压器油纸绝缘微水扩散暂态的电介质频率响应

刘君, 吴广宁, 周利军, 罗杨, 黄晓峰

(西南交通大学电气工程学院, 四川省 成都市 610031)

Dielectric Frequency Response of Oil-paper Composite Insulation With Transient Moisture Equilibrium

LIU Jun, WU Guangning, ZHOU Lijun, LUO Yang, HUANG Xiaofeng

(College of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, Sichuan Province, China)

ABSTRACT: The research on dielectric frequency response of oil-paper composite insulation with transient moisture equilibrium was carried out in order to apply dielectric frequency response to diagnose the equipment in operating condition more accurate thereof. According to the dielectric frequency response principle, the test system was established. The dielectric frequency responses of oil-paper insulation with different moisture contents, which had been get equilibrium, were measured. A theoretical model for dielectric medium with an arbitrary distribution of conductivity and dielectric constant was proposed. The dielectric frequency response of oil-paper composite insulation with transient moisture equilibrium was simulated according the steady state dielectric frequency responses. Also, the dielectric frequency responses of oil-paper composite insulation with transient moisture equilibrium were measured to verify the numerical calculation. The results show that the dielectric frequency response of oil-paper composite insulation with transient moisture equilibrium is obvious different with the steady state one. The main reason is that the transient moisture equilibrium causes the concentration polarization. With the moisture concentration gradient increases, the low-frequency relaxation enhances and the relaxation center frequency moves to higher frequency. The dielectric loss in low frequency segment is reduced too.

KEY WORDS: dielectric frequency response; oil-paper insulation; moisture; transient state; complex dielectric coefficient

摘要: 为将电介质频率响应更准确地应用于工程实际, 开展变压器油纸绝缘微水扩散暂态的电介质频率响应研究。根据

电介质频率响应原理, 建立测试系统, 测试微水分布平衡时油纸绝缘电介质频率响应; 推导介电常数及电导率不均匀分布的油纸绝缘介电模型, 根据微水分布平衡稳态时的测试结果, 对微水扩散暂态的绝缘频率响应进行数值计算; 测试油纸绝缘微水扩散暂态的电介质频率响应, 对数值计算结果进行验证。结果表明, 微水分布不平衡, 引入了微水浓差极化, 油纸绝缘的电介质响应变化较大; 随着微水浓度梯度的增大, 低频段的弛豫特征更明显, 弛豫中心频率向高频方向移动, 低频段介质损耗减小更为明显。

关键词: 频率响应; 油纸绝缘; 微水; 暂态; 复介电常数

0 引言

变压器作为电力系统的关键设备, 在电网中承担着电压转换的任务, 其运行状况直接影响电网的安全稳定^[1]。油浸式变压器广泛应用于电力系统中, 同时, 油浸式变压器也是发展超高压、特高压输变电系统的唯一选择。油纸复合绝缘作为油浸式变压器的绝缘主要组成部分, 其状态将严重影响变压器绝缘的电气寿命和机械寿命^[2-3]。因此, 对变压器油纸绝缘状态进行准确评估及诊断具有重要意义^[4]。

电介质响应法作为一种新的绝缘评估方法, 其研究始于 20 世纪 80 年代, 20 世纪 90 年代后, 回复电压法^[5-6]、极化去极化电流法^[7-8]等时域方法陆续涌现, 频率响应法由于所获信息量大而受到广泛关注^[9-12]。频率响应法是在宽频范围内测试油纸复合绝缘复介电常数实部 ϵ' 、虚部 ϵ'' 、介质损耗曲线, 通过分析其幅值、形状的变化趋势来评估油纸复合绝缘所处温度、微水含量、老化程度等绝缘状况。针对油纸绝缘微水分布平衡时的电介质响应, 国内外开展了大量研究: Saha 等利用回复电压法研究了变压器绝缘状态与电介质响应关系^[10]; Gubanski 等用频率响应法测试了现场变压器的电介质响

基金项目: 国家自然科学基金(51177136, 51107105/E0705); 西南交通大学博士研究生创新基金(2011)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (51177136, 51107105/E0705); The Innovation Fund for Doctor of Southwest Jiaotong University (2011).

应^[13]，并尝试评估油纸复合绝缘中的微水状态^[14-15]。然而，变压器油纸绝缘中微水分布根据负荷及温度变化而变化，通常处于不平衡状态。针对解除变压器所有引线，进行电介质响应离线测试时间有限，不可能微水扩散达到稳态后再进行电介质响应评估^[16]。因此，变压器油纸绝缘的微水扩散暂态及微水不平衡分布对电介质响应的影响需要研究^[15,17]。

本文推导了油纸绝缘中微水扩散暂态，即介电常数及电导率不均匀分布的油纸绝缘介电模型，根据微水分布平衡稳态时的测试结果，对微水扩散暂态的绝缘频率响应进行数值计算，分析微水浓度梯度对油纸绝缘电介质响应的影响，并通过实验对计算结果进行验证。

1 电介质频率响应原理

在平板电容两端加上时变电压 $U(t)$ ，将产生空间均匀电场 $E(t)=U(t)/d$ ， d 为电极间距离。电极两端产生的电位移 $D(t)$ ，由真空的即时贡献 $\epsilon_0 E(t)$ (ϵ_0 为真空介电常数) 和惯量延迟的极化响应 $P(t)$ 所组成^[18-19]，即

$$D(t)=\epsilon_0 E(t)+P(t) \quad (1)$$

根据电介质物理，极化响应的傅里叶变换^[19]可表示为

$$P(\omega)=\epsilon_0[\epsilon_\infty-1+\chi(\omega)]E(\omega) \quad (2)$$

式中： ϵ_∞ 为极高频介电常数； ω 为角频率； $\chi(\omega)$ 为频率相关的复极化系数。

由于麦克斯韦方程式定义的全电流包括电导电流及位移电流^[19]，即电流密度为

$$J=\sigma_0 E+\partial D/\partial t \quad (3)$$

式中： σ_0 为直流电导率，式(3)的傅里叶变换为

$$J(\omega)=\sigma_0 E(\omega)+j\omega D(\omega) \quad (4)$$

即

$$\begin{aligned} J(\omega) &= j\omega\epsilon_0\{\epsilon_\infty+\chi'(\omega)-j[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0\omega}+\chi''(\omega)]\}E(\omega) \\ &= j\omega\epsilon_0[\epsilon'(\omega)-j\epsilon''(\omega)]E(\omega) \end{aligned} \quad (5)$$

式中： $\epsilon'(\omega)$ 为复介电常数 $\epsilon(\omega)$ 实部； $\epsilon''(\omega)$ 为虚部；复极化常数的实部表示了位移电流与激励电场垂直的部分，对损耗无贡献；而其虚部给出了位移电流与激励电场同相位的部分，为损耗部分。因此，极化过程可以通过测试激励电压下的响应电流幅值和相位来研究^[20-21]。系统响应电流为

$$\begin{aligned} I(\omega) &= j\omega C_0\{\epsilon_\infty+\chi'(\omega)-j[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0\omega}+\chi''(\omega)]\}U(\omega) \\ &= j\omega[C'(\omega)-jC''(\omega)]U(\omega)=j\omega C(\omega)U(\omega) \end{aligned} \quad (6)$$

式中： $I(\omega)$ 为响应电流； $U(\omega)$ 为激励电压； C_0 为几何电容； $C'(\omega)$ 、 $C''(\omega)$ 分别为复电容 $C(\omega)$ 的实部及虚部。频域介质损耗 $\tan \delta$ 定义为

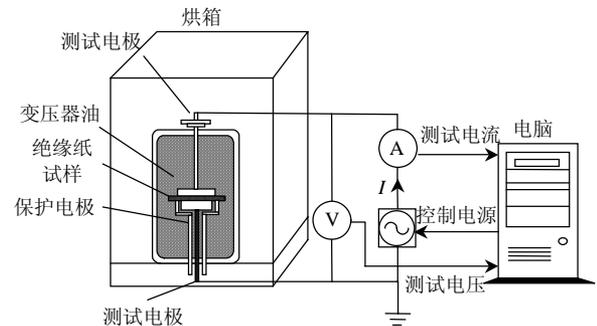
$$\tan \delta(\omega)=\frac{\epsilon''(\omega)}{\epsilon'(\omega)}=\frac{\frac{\sigma_0}{\epsilon_0\omega}+\chi''(\omega)}{\epsilon_\infty+\chi'(\omega)} \quad (7)$$

在不同频率范围内，油纸复合绝缘老化、温度、微水含量将改变其值。

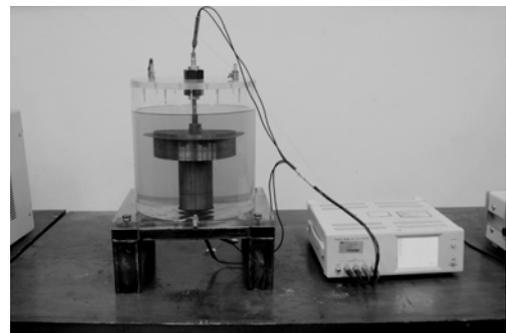
2 微水分布稳态电介质响应

搭建如图 1 所示的实验平台，将绝缘纸置于电极之间，并浸于变压器油中，利用烘箱来控制测试时温度。为了消除边缘效应，在测试电极外围增加保护电极。利用 Megger Group Limited 公司的电介质响应测试仪 IDAX300 测试油纸绝缘 $10^{-4}\sim 10^4$ Hz 范围的频率响应，利用型号为 HIOKI 3532-50 的 LCR 电桥测试油纸绝缘 $10^4\sim 10^6$ Hz 范围的频率响应。

首先将 5 组绝缘纸充分干燥，放置于空气中受潮，监测其质量变化使之微水含量分别达到 0.5%，1%，2%，3%，4%。然后浸入已制备好的 60℃ 时油纸绝缘中微水分布达到稳态的不同微水含量变压器



(a) 试验原理图



(b) 试验装置

图 1 试验系统装置

Fig. 1 Setup of the test system

油^[22]，静置 48 h 使微水分布达到平衡稳态后，测试油纸复合绝缘频率响应。为了提高测试精确性及减少测试误差，相同试样进行 3 次重复实验，剔除受干扰错误数据后取平均，结果如图 2 所示。可以看出，油纸绝缘电介质频率响应变化规律与微水含量存在较强关联。随着微水浓度增加，复介电常数实部在 10²Hz 以下增加明显，而 10² Hz 以上时略有增加，趋于一致；复介电常数在整个频率范围内呈现增加趋势，高频段增加略小。油纸绝缘微水稳态分布时，电介质频率响应与微水含量规律明显，使得应用微水分布平衡的稳态电介质响应来分析微水分布不平衡分布时的电介质频率响应成为可能。

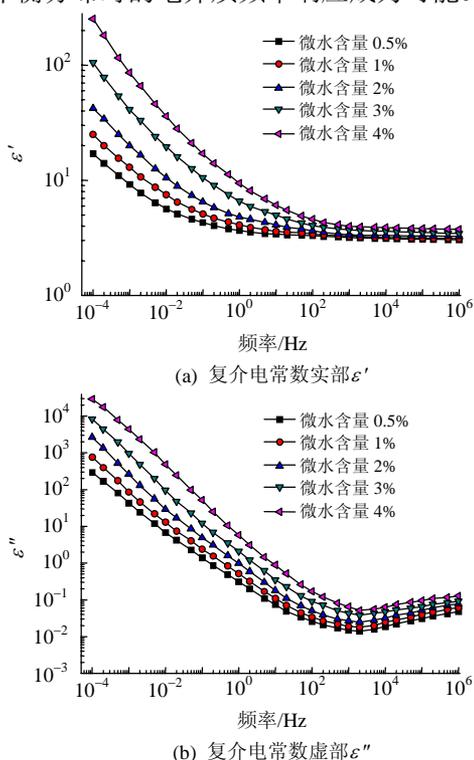


图 2 不同微水含量油纸复合绝缘频率响应

Fig. 2 Dielectric frequency response of oil-paper with different moisture

3 微水扩散暂态介电模型

简单结构油纸绝缘中微水的扩散模型及微水的分布及平均浓度随时间的变化情况在作者及其课题组所发表文献[3, 22]中已作详细分析。假设油温为 60 °C，平衡后厚度为 1 mm 的绝缘纸中的微水浓度为 3%。不同时刻微水浓度随厚度分布的情况如图 3 所示，每 2 条曲线之间间隔 2 h。

在图 3 中，微水的不平衡分布会影响油纸绝缘电介质响应。为探索由微水浓度差引起的极化层介电行为，考虑如图 4 所示的介电模型：将油纸绝缘电导率及介电常数看作为非线性任意变化。

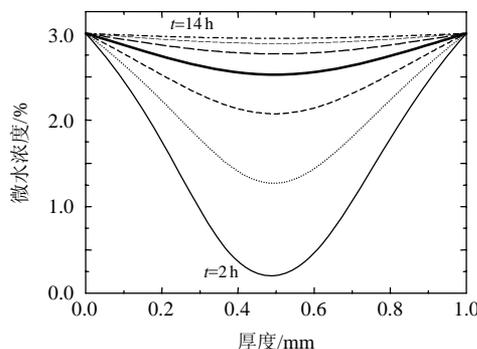


图 3 微水在 1 mm 厚双面透水绝缘纸中的暂态分布
Fig. 3 Moisture in oil-paper for double sided diffusion versus location along the paper thickness for various time

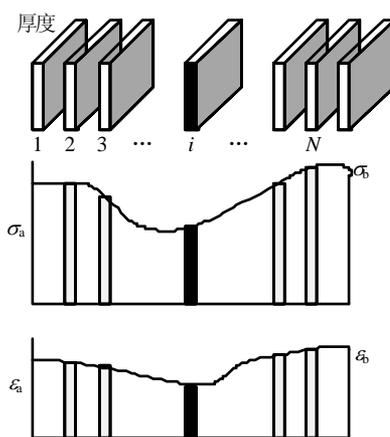


图 4 电导率及介电常数任意变化的油纸绝缘介电模型

Fig. 4 Dielectric model for the oil-paper containing arbitrary distributed conductivity and dielectric constant
整个介质层的复阻抗 $Z(f)$ 可表示为

$$Z(f) = \sum_{i=1}^N Z_i(f) = \sum_{i=1}^N \frac{1}{G_i(f)} = \frac{1}{G(f)} = \sum_{i=1}^N \frac{1}{\sigma_i + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_i} \cdot \frac{\Delta x}{S} = \sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i - j\omega\varepsilon_0\varepsilon_i}{\sigma_i^2 + (\omega\varepsilon_0\varepsilon_i)^2} \cdot \frac{\Delta x}{S} \quad (8)$$

当薄片取无限薄时，式(8)可改写为

$$Z(f)S = \frac{1}{G(f)}S = \int_0^l \frac{\sigma_x}{\sigma_x^2 + (\omega\varepsilon_0\varepsilon_x)^2} dx - j \int_0^l \frac{\omega\varepsilon_0\varepsilon_x}{\sigma_x^2 + (\omega\varepsilon_0\varepsilon_x)^2} dx \quad (9)$$

复电容与复阻抗之间的关系可表示为

$$C(f) = C_0\varepsilon(f) = \frac{1}{j\omega Z(f)S} = \frac{1}{j\omega \left[\int_0^l \frac{\sigma_x}{\sigma_x^2 + (\omega\varepsilon_0\varepsilon_x)^2} dx - j \int_0^l \frac{\omega\varepsilon_0\varepsilon_x}{\sigma_x^2 + (\omega\varepsilon_0\varepsilon_x)^2} dx \right] S} \quad (10)$$

将油纸绝缘等效为理想电容与电导并联的串联等效电路，如图 5 所示。

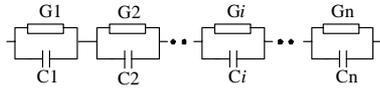


图5 油纸绝缘的串联等效电路

Fig. 5 Equivalent circuit of oil-paper insulation
针对第*i*个薄片:

$$G_i(f) = (\sigma_i + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_i) \frac{S}{\Delta x} \quad (11)$$

而复电容

$$C_i(f) = \varepsilon_i C_0 = \varepsilon_0 \frac{S}{\Delta x} (\varepsilon_i' + j\varepsilon_i'') \quad (12)$$

根据复电容与复电导之间转换关系:

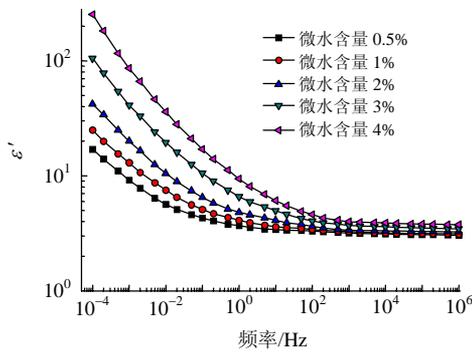
$$C_i(f) = \frac{G_i}{j\omega} = (\varepsilon_0\varepsilon_i - j\frac{\sigma_i}{\omega}) \frac{S}{\Delta x} \quad (13)$$

对比可得:

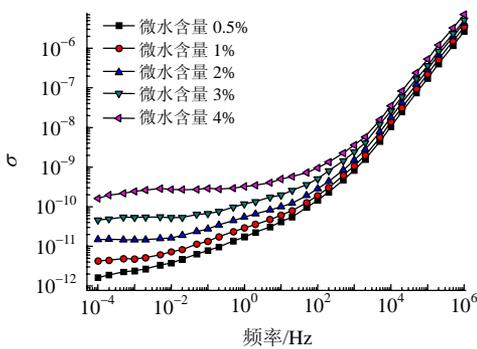
$$\varepsilon_i = \varepsilon_i', \sigma_i = \varepsilon_0\omega\varepsilon_i'' \quad (14)$$

因此,油纸绝缘微水扩散暂态的复介电常数可基于稳态复介电常数,利用式(9)积分得到其复阻抗 $Z(f)$,通过式(10)换算获得。

根据图2所示油纸绝缘不同微水含量下的电介质稳态响应,得到积分需要的实部 ε_i 及虚部 σ_i ,如图6所示。



(a) 复介电常数实部 ε'



(b) 电导率 σ

图6 复阻抗积分参数与频率关系

Fig. 6 Relationship between the integral parameter of complex impedance and frequency

4 数值计算

4.1 油纸绝缘厚度方向复介电常数实部分布

根据图6(a)不同微水含量时油纸绝缘复介电常数实部的频率依存性,研究单一频率下,复介电常数实部与微水含量的变化关系,如图7所示。

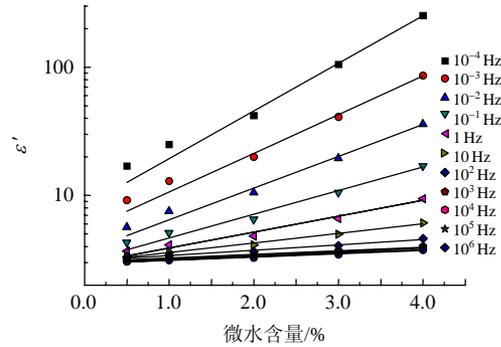


图7 单一频率下复介电常数实部与微水含量关系

Fig. 7 Relationship between the real part of complex permittivity and moisture content at single frequency

对单一频率下实部与微水的关系,利用最小二乘法拟合,拟合函数及其参数如表1所示。

根据图3所示的微水在1 mm绝缘纸中暂态分布曲线,计算2 h时油纸绝缘部各频率下的复介电常数实部分布如图8所示。

表1 单一频率下复介电常数实部与微水含量关系拟合模型

Tab. 1 Estimated model of the relationship between the real part of complex permittivity and moisture content at single frequency

f/Hz	ε'_m	f/Hz	ε'_m
10^{-4}	$e^{2.10872+0.85439m}$	10^2	$e^{1.12655+0.09585m}$
10^{-3}	$e^{1.66636+0.69508m}$	10^3	$e^{1.1138+0.06504m}$
10^{-2}	$e^{1.29438+0.56975m}$	10^4	$e^{1.09274+0.06439m}$
10^{-1}	$e^{1.11086+0.42631m}$	10^5	$e^{1.08348+0.06106m}$
1	$e^{1.07502+0.28489m}$	10^6	$e^{1.07617+0.05846m}$
10	$e^{1.10224+0.17278m}$	—	—

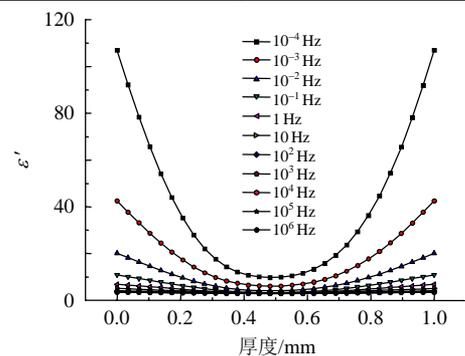


图8 2 h时不同频率下油纸绝缘复介电常数实部沿厚度方向分布

Fig. 8 Real part of complex permittivity versus location along the oil-paper thickness for different frequency at 2 h

由于双面透水对称性，对油纸绝缘 0~0.5 mm 复介电常数拟合，如图 9 所示。

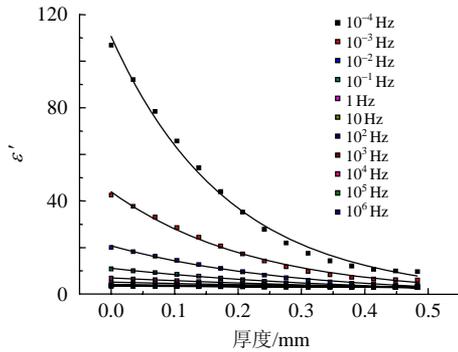


图 9 2 h 时油纸绝缘厚度 0~0.5 m 范围复介电常数实部分布及其拟合曲线

Fig. 9 Real part of complex permittivity and their modeled curves versus location along the oil-paper thickness about 0~0.5mm for different frequency at 2h

单一频率下实部在油纸绝缘不同厚度的分布关系利用最小二乘法拟合，拟合函数及其参数如表 2 所示。

表 2 2 h 时单一频率下复介电常数实部与油纸绝缘厚度关系拟合模型

Tab. 2 Estimated model of the relationship between the real part of complex permittivity and the thickness of oil-paper at single frequency

f/Hz	ϵ'_d	f/Hz	ϵ'_d
10^{-4}	$e^{4.705\ 79-5.481\ 9d}$	10^2	$e^{1.417\ 56-0.620\ 71d}$
10^{-3}	$e^{3.783\ 26-4.512\ 1d}$	10^3	$e^{1.311\ 03-0.420\ 17d}$
10^{-2}	$e^{3.031\ 68-3.721\ 31d}$	10^4	$e^{1.288-0.415\ 95d}$
10^{-1}	$e^{2.411\ 61-2.792\ 74d}$	10^5	$e^{1.268\ 61-0.394\ 33d}$
1	$e^{1.943\ 66-1.863\ 08d}$	10^6	$e^{1.253\ 4-0.377\ 46d}$
10	$e^{1.628\ 02-1.124\ 55d}$	—	—

同理，根据图 3 及表 1，可得到不同扩散时间 4, 6, 8, 10, 12, 14h 时复介电常数实部在油纸绝缘不同厚度的分布关系。

4.2 油纸绝缘厚度方向电导率分布

根据图 6(b)不同微水含量时油纸绝缘电导率的频率依存关系，研究单一频率下，电导率与微水含量的变化关系，如图 10 所示。

对单一频率下电导率与微水的关系，利用最小二乘法拟合，拟合函数及其参数如表 3 所示。

同理，根据图 3 所示的微水在 1 mm 绝缘纸中暂态分布曲线，计算 2 h 时油纸绝缘不同频率下的电导率分布如图 11 所示。

由于双面透水对称性，对 0~0.5 mm 厚度电导率进行拟合，如图 12 所示。

对单一频率下电导率在油纸绝缘不同厚度的

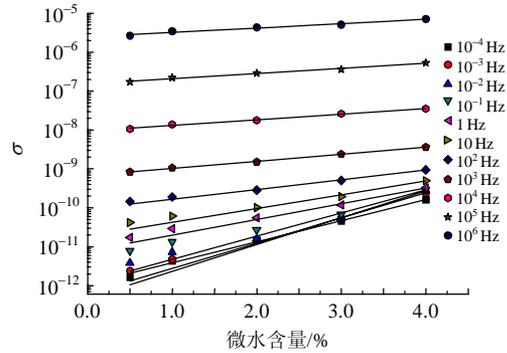


图 10 单一频率下电导率与微水含量关系

Fig. 10 Relationship between the conductivity and moisture content at single frequency

表 3 单一频率下电导率与微水含量关系拟合模型

Tab. 3 Estimated model of the relationship between the conductivity and moisture content at single frequency

f/Hz	σ_m	f/Hz	σ_m
10^{-4}	$e^{-27.518\ 53+1.242\ 06m}$	10^2	$e^{-23.092\ 42+0.575\ 17m}$
10^{-3}	$e^{-28.107\ 07+1.493\ 13m}$	10^3	$e^{-21.121\ 66+0.420\ 53m}$
10^{-2}	$e^{-28.376\ 83+1.587\ 62m}$	10^4	$e^{-18.472\ 05+0.328\ 02m}$
10^{-1}	$e^{-27.440\ 94+1.368\ 27m}$	10^5	$e^{-15.689\ 76+0.304\ 58m}$
1	$e^{-25.580\ 01+0.929\ 87m}$	10^6	$e^{-12.898\ 69+0.257\ 59m}$
10	$e^{-24.703+0.816\ 04m}$	—	—

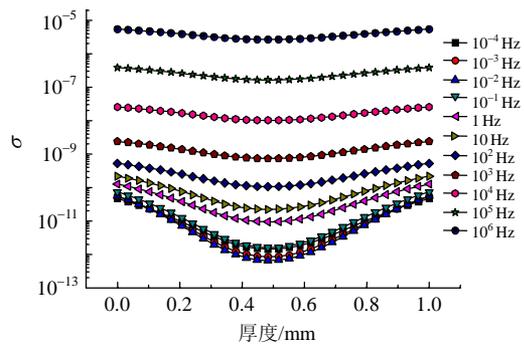


图 11 2 h 时不同频率下油纸绝缘电导率沿厚度方向分布

Fig. 11 Conductivity versus location along the oil-paper thickness for different frequency at 2h

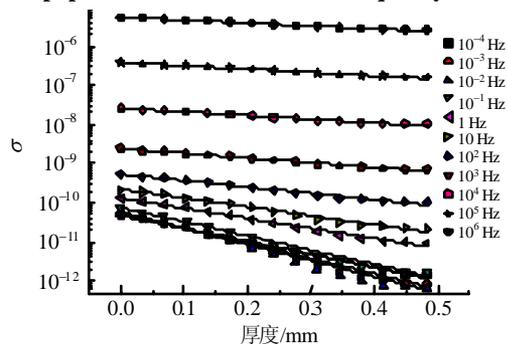


图 12 2 h 时油纸绝缘厚度 0~0.5 mm 范围电导率分布及其拟合曲线

Fig. 12 Conductivity and their modeled curves versus location along the oil-paper thickness about 0~0.5 mm for different frequency at 2h

分布关系利用最小二乘法拟合, 拟合函数及其参数如表4所示。

表4 2 h时单一频率下电导率与油纸绝缘厚度关系拟合模型

Tab. 4 Estimated model of the relationship between the conductivity and the thickness of oil-paper for single frequency at 2 h

f/Hz	σ_d	f/Hz	σ_d
10^{-4}	$e^{-23.760\ 31-7.672\ 59d}$	10^2	$e^{-21.338\ 67-3.755\ 95d}$
10^{-3}	$e^{-23.599\ 26-8.991\ 48d}$	10^3	$e^{-19.838\ 54-2.7549\ 3d}$
10^{-2}	$e^{-23.587\ 03-9.474\ 15d}$	10^4	$e^{-17.471\ 51-2.147\ 34d}$
10^{-1}	$e^{-23.305\ 82-8.343\ 09d}$	10^5	$e^{-14.760\ 89-1.992\ 9d}$
1	$e^{-22.756\ 2-5.926\ 59d}$	10^6	$e^{-12.113\ 56-1.683\ 07d}$
10	$e^{-22.221\ 31-5.252\ 27d}$	—	—

同理, 根据图3, 以及表3, 可得到不同扩散时间4, 6, 8, 10, 12, 14 h时复介电常数实部在油纸绝缘不同厚度的分布关系。

4.3 复介电常数计算

针对单个频率下油纸绝缘复介电常数、电导率在油纸绝缘厚度分布关系表2、4, 代入式(9)所表示的复阻抗与复介电常数实部及电导率的积分关系, 可积分得微水扩散2 h时的油纸绝缘复阻抗, 并利用式(10)所示复阻抗与复介电常数的关系, 可得到复介电常数分布情况。同理, 不同平衡时间下复介电常数的频率依存性可积分获得, 结果如图13所示。可以看出, 随着微水浓度梯度的增大, 油纸绝缘复介电常数实部在 10^{-2} Hz以下的低频范围内增大, 而在 $10^{-2}\sim 10^2$ Hz频率范围内减小, 10^2 Hz以上的高频范围内略微减小而趋于一致。随着微水浓度梯度的增大, 油纸绝缘复介电常数虚部在整个频率范围内减小; 介质损耗在整个频率范围内减小, 10^2 Hz以下的低频段减小程度更为明显。

微水分布达到平衡(即稳态)后, 不存在由微水分布不均造成的浓差极化, 忽略试样与电极之间的油隙影响, 可认为油纸绝缘体系是具有复介电常数 ϵ 的均一相, 具有如图2所示的微水稳态分布油纸绝缘体系电介质响应特征。随着浓度梯度的增大(整体微水含量减小), 低频段的弛豫即浓差极化的特征变得明显, 油纸绝缘体系阻抗增大相当于直流电导下降(复介电常数虚部)。此外, 高频段的弛豫中心频率基本不变, 只是由浓差极化引起的低频弛豫中心频率向高频移动, 其弛豫峰基本出现在测试的频率范围。由介质损耗可以看出, 浓度梯度的增大, 使得油纸绝缘体系中微水含量总体低于微水扩散平衡时的微水总量, 这在一定程度上减小了油纸绝

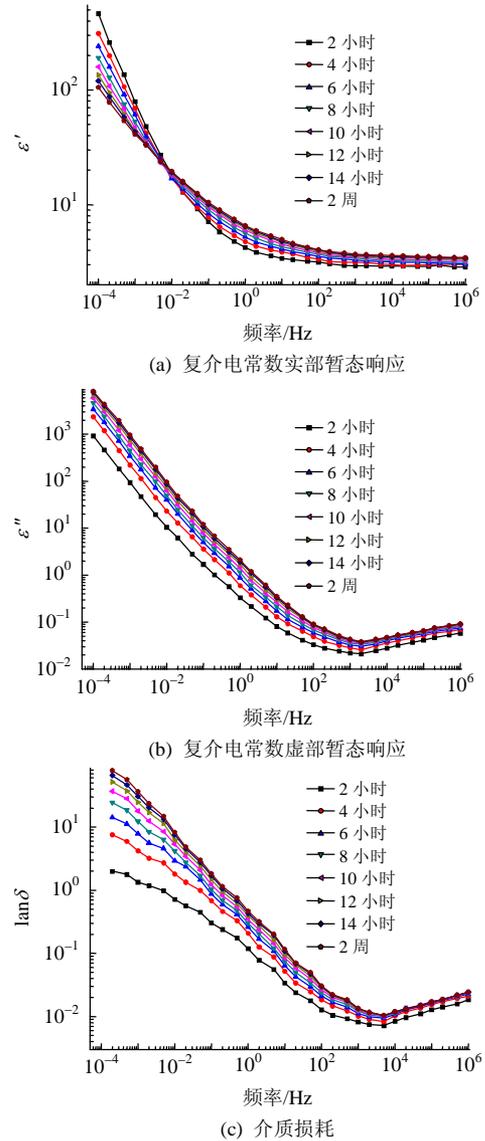


图13 油纸绝缘微水扩散不同平衡时间下暂态电介质频率响应

Fig. 13 Dielectric frequency response of oil-paper composite insulation with transient moisture equilibrium at different time

缘的电导性, 从而使得介质损耗减小。同时, 由于浓差极化的存在, 使得电荷的迁移及各层界面极化的建立变得困难和缓慢, 造成在低频段的介质损耗减小得更为明显。浓差极化模型的建立, 为分析微水扩散造成的微水浓差极化系统提供了基本的分析依据。

5 实验验证

设定油温为 60°C , 平衡后绝缘纸的微水浓度为3%, 通过油循环使绝缘油中微水浓度保持不变。试样厚度与建模时采用的1 mm厚度一致。绝缘纸在浸油前充分干燥, 在微水扩散的过程中, 每隔2 h测试一次油纸绝缘体系的复介电常数, 直到微水扩

散基于平衡, 微水分布达到稳态。由于超低频测试需要的时间较长, 测试过程中微水扩散也在进行, 为了避免测试时间对结果的影响, 试验验证只测试 $10^{-2} \sim 10^6$ Hz 频率范围电介质响应, 测试结果与图 13 所示的油纸绝缘微水扩散暂态电介质频率响应曲线对比, 如图 14 所示。

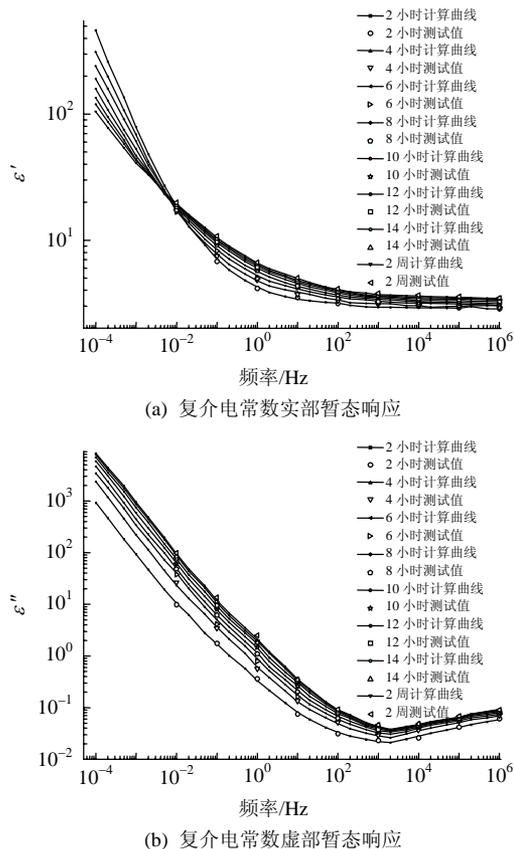


图 14 油纸绝缘微水扩散不同平衡时间下暂态电介质频率响应测试值及拟合曲线

Fig. 14 Measured data and modeled curves of dielectric frequency response of oil-paper composite insulation with transient moisture equilibrium at different time

由测试结果可以看出, 测试所得的油纸绝缘复介电常数与通过稳态响应积分得到的暂态响应基本一致, 验证了本方法的有效性。从图 14 可以看出, 微水分布不平衡的情况下, 油纸绝缘的响应与稳态时的电介质响应有较大的区别。

6 结论

1) 微水分布平衡稳态时, 油纸绝缘电介质频率响应变化规律与微水含量存在较强关联, 可应用微水分布平衡的稳态电介质响应来分析微水分布不平衡分布时的电介质频率响应。

2) 建立了油纸绝缘电导率及介电常数非线性任意变化的介电模型, 推导了宏观测量的频率响应与介电体自身结构和电性质定量关系。

3) 基于微水分布不平衡的介电模型, 根据油纸绝缘复介电常数实部及电导率与微水分布的关联关系, 对油纸微水扩散暂态的油纸绝缘频率响应进行数值计算, 并通过测试油纸绝缘微水扩散暂态的电介质频率响应实验, 对数值计算结果进行验证, 体现出较好一致性。

4) 微水分布不平衡, 引入了微水浓差极化, 油纸绝缘的电介质响应变化较大。随着微水浓度梯度的增大, 低频段的弛豫特征更明显, 弛豫中心频率向高频方向移动, 低频段介质损耗减小更为明显。

浓差极化模型的建立, 为分析微水扩散造成的微水浓差极化系统提供了基本的分析依据。因此, 在变压器绝缘状态评估时, 应考虑变压器停运的时间, 并对停电时间短的变压器做电介质响应测试时, 应考虑其暂态响应与本身稳态电介质响应的误差, 通过测试油中微水含量以及停运时间及环境温度, 校正结果来评估其本质的绝缘状态。

参考文献

- [1] Wang M, Vandermaar A J, Srivastava K D. Review of condition assessment of power transformers in service [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6): 12-25.
- [2] Lundgaard L E, Hansen W, Linhjell D, et al. Aging of oil-impregnated paper in power transformers[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(1): 230-239.
- [3] 周利军, 汤浩, 张血琴, 等. 油纸绝缘微水扩散的暂态分布模型[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(7): 134-140. Zhou Lijun, Tang Hao, Zhang Xueqin, et al. Disequilibrium moisture partition in oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(7): 134-140(in Chinese).
- [4] 廖瑞金, 郝建, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘频域介电谱特性的仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 113-119. Liao Ruijin, Hao Jian, Yang Lijun, et al. Simulation and experimental study on frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformers [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 113-119(in Chinese).
- [5] Saha T K. 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.
- [6] 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.

- [7] Saha T K, Purkait P. Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 144-154.
- [8] Zaengl W S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment, part I: theoretical considerations[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(5): 5-19.
- [9] Linhjell D, Lundgaard L. Dielectric response of mineral oil impregnated cellulose and the impact of aging[J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 156-169.
- [10] Saha T K, Purkait P. Understanding the impacts of moisture and thermal ageing on transformer's insulation by dielectric response and molecular weight measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(2): 568-581.
- [11] 刘君, 周利军, 吴广宁. 纳米改性变压器油-纸复合绝缘频率响应特性[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 144-153.
Liu Jun, Zhou Lijun, Wu Guangning. Dielectric frequency response of oil-paper composite insulation modified by nanoparticles[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(28): 144-153(in Chinese).
- [12] 王世强, 魏建林, 杨双锁, 等. 油纸绝缘加速热老化的频域介电谱特性[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(34): 125-131.
Wang Shiqiang, Wei Jianlin, Yang Shuangshuo, et al. Frequency domain dielectric spectroscopy characteristics of oil-paper insulation under accelerated thermal aging[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(34): 125-131(in Chinese).
- [13] Blennow J, Gubanski S M. Field experiences with measurements of dielectric response in frequency domain for power transformer diagnostics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 21(2): 681-688.
- [14] Ekanayake C, Gubanski S M, Graczkowski A, et al. Frequency response of oil impregnated pressboard and paper samples for estimating moisture in transformer insulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1309-1317.
- [15] Ekanayake C. Diagnosis of moisture in transformer insulation-application of frequency domain spectroscopy [D]. Goteborg: Chalmers University of Technology, 2006: 5-40.
- [16] Seytashmehr A, Fofana I, Akbari A, et al. Effects on temperature on the dielectric response of transformer [J]. International Symposium on High Voltage Engineering. Ljubljana, Slovenia, 2007: T8-537.
- [17] Saha T K, Purkait P. Investigations of temperature effects on the dielectric response measurements of transformer oil-paper insulation system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(1): 252-260.
- [18] Boss P, Csépes G, Der Houhannessian V. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(3): 12-18.
- [19] Jonscher A K. Dielectric relaxation in solids[M]. London: Dielectrics Press Limited, 1996: 66-110.
- [20] 殷之文. 电介质物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2003: 57-65.
Yin Zhiwen. Dielectric physics[M]. Beijing: Science Press, 2003: 57-65(in Chinese).
- [21] 赵孔双. 介电谱方法及应用[M]. 北京: 化学工业出版社, 2008: 50-57.
Zhao Shuangkong. Dielectric and spectroscopy method and application[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2008: 50-57(in Chinese).
- [22] Zhou L J, Wu G N, Liu J, Modeling of transient moisture equilibrium in oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 872-878.



刘君

收稿日期: 2012-06-13。

作者简介:

刘君(1984), 男, 博士研究生, 主要从事变压器绝缘老化机理及其状态评估方面的研究, liu1983jun@126.com;

吴广宁(1969), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 从事高电压与绝缘技术方面的教学和科研工作;

周利军(1978), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

(责任编辑 张媛媛)