

DOI:10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.160869

变压器油纸绝缘系统低频介电参数方程

王东阳 周利军 陈雪骄 刘伟迪 王路伽

(西南交通大学电气工程学院 成都 610031)

摘要 油纸绝缘系统频域介电谱的低频部分更有利于诊断、评估绝缘系统的老化状态与水分含量，为了将频域介电响应法更好地应用到工程中，针对变压器油纸绝缘系统低频激励下的介电响应进行了研究。首先分析了绝缘电介质(油隙、油浸纸)在低频激励下的电极极化过程，进而提出以电导率、离子迁移率等为参量的绝缘电介质的介电参数方程；然后基于变压器油纸绝缘系统的XY几何等效模型，构建变压器油纸绝缘系统低频介电参数方程；最后通过试验对所构建的介电参数方程进行验证。研究结果表明：油纸绝缘系统介电参数计算值与试验值相符合，建立的介电参数方程能够有效地表征变压器油纸绝缘系统频域介电响应低频部分的介电参数。

关键词：油纸绝缘系统 频域介电响应法 电极极化 XY模型

中图分类号：TM855

Complex Relative Permittivity Expressions of Oil-Paper Insulation for Low Frequency Domain Dielectric Response

Wang Dongyang Zhou Lijun Chen Xuejiao Liu Weidi Wang Lujia

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

Abstract Frequency domain dielectric response method has been one of the most effective approaches for the condition assessment of oil-paper insulation, and the low frequency part of the response is more effective for diagnosing the moisture content and aging status of oil-paper insulation. To facilitate the using of frequency dielectric domain dielectric response in engineering, the low frequency part dielectric response of oil-paper insulation system was studied in this paper. First, the electrode polarization of insulation dielectrics (oil-gap and oil-immersed paper) was analyzed when it is applied with low frequency excitations. Then, the complex relative permittivity expressions of insulation dielectric were obtained based on conductivity, ionic mobility and other parameters. On the basis of the geometric equivalent model (XY model) of oil-paper insulation system, the complex relative permittivity expressions of oil-paper insulation system for low frequency were obtained. Finally, the validity of established expressions about dielectric constants were testified by comparing the simulated and measured results. The results show that: the calculated complex relative permittivity can fit the measured results well, and the established expressions can effectively express the low frequency part dielectric response of oil-paper insulation system.

Keywords: Oil-paper insulation system, frequency domain dielectric response method, electrode polarization, XY model

0 引言

油浸式变压器是电力系统的核心设备，其内部油

国家自然科学基金资助项目(51577159)。

收稿日期 2016-06-08 改稿日期 2016-09-22

纸绝缘系统性能的好坏是影响变压器寿命的重要因素^[1,2]。频域介电响应法(Frequency Domain Dielectric Spectrum, FDDS)是能够有效诊断油纸绝缘系统水分含量及其老化状态的方法之一，相对于传统诊断变压器绝缘老化状态的方法：化学方法(油中溶解气体、

糠醛分析等)、绝缘纸聚合度测试法和传统电方法(工频介损测试等)，频域介电响应法具有抗干扰能力强、携带信息丰富等特点，具有很高的研究与实用价值^[3]。

油纸绝缘系统属于复合电介质，油浸式变压器的油纸绝缘系统主要由油隙、纸筒压板与撑条等构成。相关研究多采用XY模型作为其几何等效模型^[4-6]。油纸绝缘系统的介电特性因老化或受潮而发生变化，频域介电响应法正是以此为基础对变压器油纸绝缘系统的绝缘状态进行评估和诊断。国内外相关学者主要从四个方面开展研究^[7-14]：①温度、水分与老化等因素对油纸绝缘系统频域介电响应的影响与校正方法；②油纸绝缘系统频域介电响应的建模与频域介电谱的解释；③用于诊断油纸绝缘系统状态的频域介电谱特征参量提取及其诊断方法；④频域介电响应测试方法的优化。上述几方面研究中，主要是实验室内针对油纸绝缘试样进行，现场测试多为对所提诊断方法的验证。研究均发现油纸绝缘系统的低频响应部分相对于中、高频部分，对油隙与绝缘纸(板)的材料介电特性的变化更敏感，更有利诊断评估油纸绝缘系统的老化状态与水分含量^[15]。重庆大学学者通过对低频介电谱积分处理研究了油纸绝缘系统频域介电谱的特征参量提取方法及其绝缘状态诊断方法^[16]。油纸绝缘系统在低频介电响应测试过程中起主导作用的机制为电极极化，然而其作用效果会使油纸绝缘系统的频域介电谱低频部分产生弥散现象。澳大利亚昆士兰大学学者尝试通过修正油纸绝缘系统的极化等效电路模型来表征电极极化的作用效果^[17]。西安交通大学学者基于随机自有障碍模型给出了油纸绝缘系统低频介电响应过程中交流电导率随频率变化的表达式^[8]。西南交通大学学者对低频激励下油隙的电极极化物理过程进行了建模并给出了对应的介电参数方程^[18]。上述研究均为油纸绝缘系统低频介电响应的机理理解与应用提供了很好的理论基础。

为了能够更好地解析频域介电响应测试结果，为后续研究各因素对测试结果的影响，最终提取特征参量用于实际工程，本文针对变压器油纸绝缘系统低频激励下介电响应进行了研究。首先分析油隙、油浸纸(板)在低频激励下的电极极化过程，进而提出以离子浓度、离子迁移率等为参量的油隙、油浸纸(板)介电参数方程；然后基于变压器油纸绝缘系统的XY几何等效模型，构建变压器油纸绝缘系统低频介电响应模型；最后通过试验对所构建的介电参数方程进行了验证。

1 油纸绝缘系统低频介电响应建模

绝缘电介质在电场作用下离子分布示意图如图1所示，极板间距离为L，极板中间填充绝缘电介质，为油隙或油浸纸(板)，极板之间可通过施加外部激励电压从而产生电场E。在外施电场的作用下，绝缘电介质中的载流子(正、负离子)产生定向移动，并且分别大量地聚集在电极附近，形成电极极化层。为了补偿束缚离子产生的影响并且维持极板间电场强度不变，外施电源将补充电荷到极板并成为极板上的束缚电荷^[19]。绝缘电介质中离子运动除受电场作用外，还受到因离子浓度差产生的热扩散作用。当电场作用和热扩散作用达到平衡时，绝缘电介质中的离子浓度分布即达到平衡，则绝缘电介质整体表现为宏观上的偶极子。

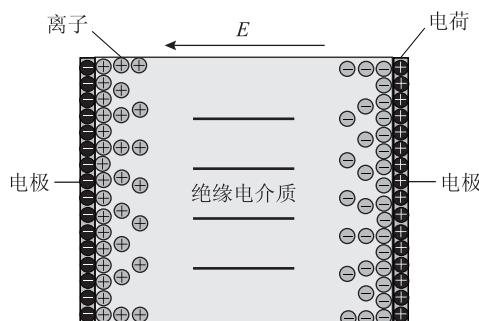


图1 绝缘电介质在电场作用下离子分布示意图

Fig. 1 Schematic diagram of ion distribution in insulating dielectrics under electric field

极板间绝缘电介质在外施电场作用下发生电极极化的弛豫时间 τ 为^[20]

$$\tau = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{n_0 e \mu} \quad (1)$$

式中， ε_r 为绝缘电介质的工频相对介电常数； ε_0 为真空介电常数；e为单位电荷带电量； n_0 为离子浓度； μ 为离子迁移率。当绝缘电介质中离子浓度分布平衡后，在极板之间形成的电极极化层厚度(德拜长度) L_D 为

$$L_D = \frac{1}{e} \sqrt{\frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 k T}{n_0}} \quad (2)$$

式中，k为玻耳兹曼常数， $k = 1.38 \times 10^{-23}$ J/K；T为温度，K。

绝缘电介质的初始直流电导率 σ_0 与离子浓度 n_0 的关系为

$$n_0 = \frac{\sigma_0}{2e\mu} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1)、式(2)可得

$$\begin{cases} \tau = \frac{2\epsilon_r \epsilon_0}{\sigma_0} \\ L_D = \frac{1}{e} \sqrt{\frac{2\epsilon_r \epsilon_0 k T \mu}{\sigma_0}} \end{cases} \quad (4)$$

当极板间外施低频激励是角频率为 ω 、初相角为 0 的正弦交流电压 $u(t)$ 时, 因电极极化作用产生的介电参数随频率的变化满足德拜弛豫方程, 即

$$\epsilon_{EP}^*(\omega) = \epsilon_r + \frac{\Delta\epsilon_{EP}}{1 + i\omega\tau_{EP}} \quad (5)$$

其中

$$\begin{cases} \Delta\epsilon_{EP} = \left(\frac{L}{2L_D} - 1 \right) \epsilon_r \\ \tau_{EP} = \frac{L}{2L_D} \tau \end{cases} \quad (6)$$

将式(4)、式(6)代入式(5), 并将式(5)实部、虚部分离可得

$$\begin{cases} \epsilon'_{EP}(\omega) = \epsilon_r + \frac{\epsilon_r L \sqrt{\frac{e\sigma_0^3 \mu k T}{2\epsilon_r \epsilon_0}} - 2\sigma_0 \mu k T \epsilon_r}{2\sigma_0 \mu k T + \omega^2 L^2 \epsilon_r \epsilon_0 e} \\ \epsilon''_{EP}(\omega) = \frac{\sigma_0 \omega L^2 e \epsilon_r - \epsilon_r \omega L \sqrt{2\sigma_0 \mu k T \epsilon_r \epsilon_0 e}}{2\sigma_0 \mu k T + \omega^2 L^2 \epsilon_r \epsilon_0 e} \end{cases} \quad (7)$$

考虑绝缘电介质松弛极化损耗(以工频相对复介电常数虚部表征)以及在低频激励下直流电导引起的损耗, 则基于式(7)可得到低频激励下绝缘电介质的介电参数方程为

$$\begin{cases} \epsilon'(\omega) = \epsilon_r + \frac{\epsilon_r L \sqrt{\frac{e\sigma_0^3 \mu k T}{2\epsilon_r \epsilon_0}} - 2\sigma_0 \mu k T \epsilon_r}{2\sigma_0 \mu k T + \omega^2 L^2 \epsilon_r \epsilon_0 e} \\ \epsilon''(\omega) = \epsilon''_{EP} + \frac{\sigma_0 \omega L^2 e \epsilon_r - \epsilon_r \omega L \sqrt{2\sigma_0 \mu k T \epsilon_r \epsilon_0 e}}{2\sigma_0 \mu k T + \omega^2 L^2 \epsilon_r \epsilon_0 e} + \frac{\sigma_{DC}}{\omega} \end{cases} \quad (8)$$

式中, ϵ'' 为工频相对复介电常数虚部; σ_{DC} 为绝缘电介质的稳态直流电导率。

图 2 为变压器油纸绝缘系统 XY 几何等效模型示意图, X 定义为纸筒总厚度与高低压绕组间主绝缘厚度的比值, Y 定义为撑条的总宽度与高低压绕组间主绝缘平均周长的比值, 相关研究中将撑条、纸筒统称为油浸纸(板)。

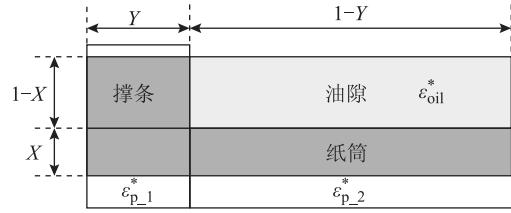


图 2 XY 几何等效模型

Fig. 2 XY geometric equivalent model

根据电介质串并联等效电路, 将图 2 所示几何等效模型分为三部分, 在温度 T 下施加角频率为 ω 的正弦低频交流激励电压, 则油纸绝缘系统的介电参数可表示为

$$\epsilon^*(\omega, T) = Y\epsilon_{p,1}^*(\omega, T) + \frac{1-Y}{\epsilon_{oil}^*(\omega, T)} + \frac{X}{\epsilon_{p,2}^*(\omega, T)} \quad (9)$$

式中, $\epsilon^*(\omega, T)$ 为油纸绝缘系统的相对复介电常数; $\epsilon_{p,1}^*(\omega, T)$ 为与油隙并联部分的油浸纸(板)的相对复介电常数; $\epsilon_{p,2}^*(\omega, T)$ 为与油隙串联部分的油浸纸(板)的相对复介电常数; $\epsilon_{oil}^*(\omega, T)$ 为油隙的相对复介电常数。

根据式(9)分离得到油纸绝缘系统相对复介电常数实部与虚部表达式为

$$\begin{cases} \epsilon'_{tot}(\omega, T) = Y\epsilon'_p + \frac{(1-Y)(A\epsilon'_o + B\epsilon'_p)}{(A\epsilon'_o + B\epsilon'_p)^2 + (A\epsilon''_o + B\epsilon''_p)^2} \\ \epsilon''_{tot}(\omega, T) = Y\epsilon''_p + \frac{(1-Y)(A\epsilon''_o + B\epsilon''_p)}{(A\epsilon'_o + B\epsilon'_p)^2 + (A\epsilon''_o + B\epsilon''_p)^2} \end{cases} \quad (10)$$

其中

$$\begin{cases} A = \frac{1-X}{\epsilon'^2_o + \epsilon''^2_o} \\ B = \frac{X}{\epsilon'^2_p + \epsilon''^2_p} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\epsilon'_{tot}(\omega, T)$ 、 $\epsilon''_{tot}(\omega, T)$ 分别为油纸绝缘系统相对复介电常数实部、虚部; ϵ'_o 、 ϵ''_o 分别为油隙相对复介电常数实部、虚部; ϵ'_p 、 ϵ''_p 分别为油浸纸相对复介电常数实部、虚部。

综上, 式(8)与式(10)即为本文构建的低频激励下油纸绝缘系统介电参数方程, 通过试验测试得到油隙、油浸纸的相关参数(离子迁移率、电导率等), 然后代入式(8)则可计算得到低频激励下油隙、油浸纸(板)各自的相对复介电常数, 进而根据式(10)可计算得到油纸绝缘系统低频激励下的介电参数。

2 试验

频域介电响应法在实际工程中是直接测试现场变压器油纸绝缘的介电响应，通过现有的诊断方法评估其绝缘状态。然而国内外相关研究学者实验室内针对建立的油纸绝缘频域介电响应模型或介电参数方程的验证工作均基于人工处理得到的油纸绝缘试样^[21,22]。本文对于所建立的介电参数方程的验证亦是基于实验室处理得到的油纸绝缘试样。本文试验材料选用25号克拉玛依环烷基矿物变压器新油，未老化的变压器纤维素绝缘纸（厚度分别为0.3 mm与1 mm）。将厚度为0.3 mm的绝缘纸裁剪为直径为80 mm的圆形纸片，将厚度为1 mm的绝缘纸裁剪为内径18 mm、外径80 mm的圆环形纸片。试验前，将变压器油真空脱气，并在50 °C/50 Pa恒温箱中干燥至水分含量为 11×10^{-6} （电气性能满足IEC 60296—2003，变压器油中水分测试参照IEC 60814—1997），然后存入广口瓶中充入干燥氮气并密封保存。将绝缘纸在90 °C/50 Pa恒温箱中干燥48 h，采用卡尔费休测试法（梅特勒-托利多C20测试仪）测得绝缘纸中水分含量小于0.5%（水分测试参照IEC 60814—1997），然后存入防潮密封袋中保存。如图3所示，本文试验系统采用三电极测试系统，电极表面光滑，电压电极直径为40 mm，测量电极直径为24 mm，保护电极外径为40 mm，保护电极内径为30 mm，测量电极与保护电极中间绝缘。为保证试验测试的有效性，试验过程中每组试验均进行五次测试，去掉最高值与最低值，取剩余三组值的平均值。

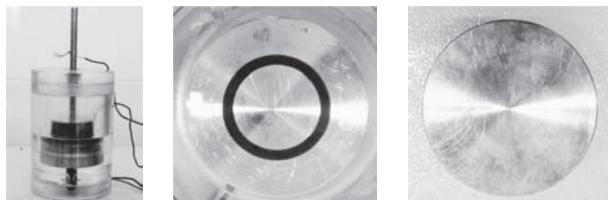


图3 三电极测试系统

Fig. 3 Three electrode test system

2.1 油纸绝缘系统频域介电谱测试

将1 mm、0.3 mm厚的绝缘纸依次上、下顺序放入三电极系统，然后倒入处理后的变压器油，则根据上述绝缘纸尺寸与电极尺寸可知，本文试验对象的X=0.23，Y=0.25。如图4所示，测试仪器采用IDAX-300频域介电响应分析仪，测试频率范围为 $10^{-3} \sim 10^3$ Hz。将试验样品依次静置于30 °C、50 °C与75 °C的环境温度中，24 h后测试其频域介电谱。



图4 频域介电响应测试系统

Fig. 4 Frequency domain dielectric response test system

2.2 初始直流电导率与稳态直流电导率测试

本文中电导率测试系统如图5所示，在三电极测试系统的电压电极与测量电极之间通过Agilent 33220A数字信号发生器施加幅值为10 V的直流电压，电流通过HB-321微电流测试仪测试。根据IEC 61620—1999与ASTM D257—2007，测试过程中分别记录10 s与10 000 s的电流，则初始直流电导率 σ_0 与稳态直流电导率 σ_{DC} 可根据式(12)、式(13)计算得到。

$$\sigma_0 = \frac{US}{I_{t=10} L} \quad (12)$$

$$\sigma_{DC} = \frac{US}{I_{t=10\ 000} L} \quad (13)$$

式中，U为外施电压的幅值；S为测量电极的表面积；L为被测样品的厚度。

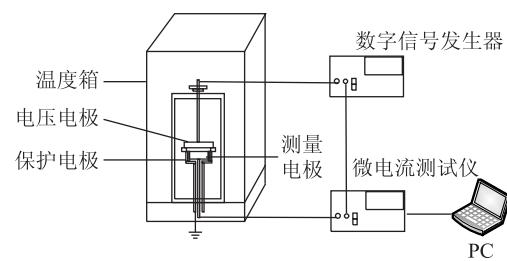


图5 电导率测试系统

Fig. 5 Conductivity test system

试验中选用1 mm厚的聚酯薄膜，将薄膜裁成内径为12 mm、外径为40 mm的圆环，保证测量电极和电压电极之间能够形成厚度为1 mm的密闭油隙，用以测试变压器油的初始直流电导率与稳态直流电导率，测试过程中依次将三电极测试系统静置于30 °C、50 °C与75 °C的环境温度中24 h后测试其初始直流电导率与稳态直流电导率。试验中选用1 mm厚的绝缘纸放入三电极测试系统，真空充分浸油后依次测试30 °C、50 °C与75 °C条件下的初始直流电导率与稳态直流电导率。

2.3 离子迁移率测试

本文中离子迁移率测试系统与试验材料预处理均与2.2节中所述相同。在电压电极与测量电极之间施加如图6所示的方波电压，电压幅值为10 V，则当电

压极性反转后，微电流测试仪测量的电流会出现一个暂态的峰值，记录从电压极性反转到出现电流峰值所需的时间 t_{peak} ，则离子迁移率可进一步通过式(14)计算得到^[23,24]。

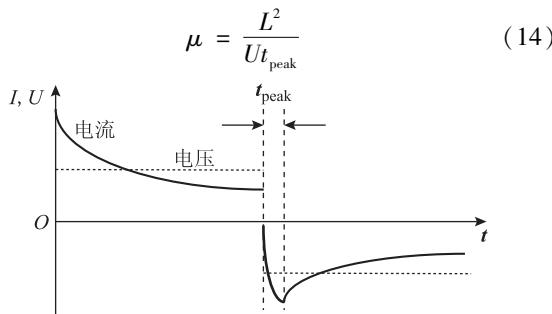


图6 电压极性反转与电流示意图

Fig. 6 Schematic diagram of voltage polarity reversal and current

3 试验结果与介电参数方程验证

3.1 试验结果

如图7所示，依据2.1节所述试验步骤，测得本文所用油纸绝缘系统模型的频域介电谱。

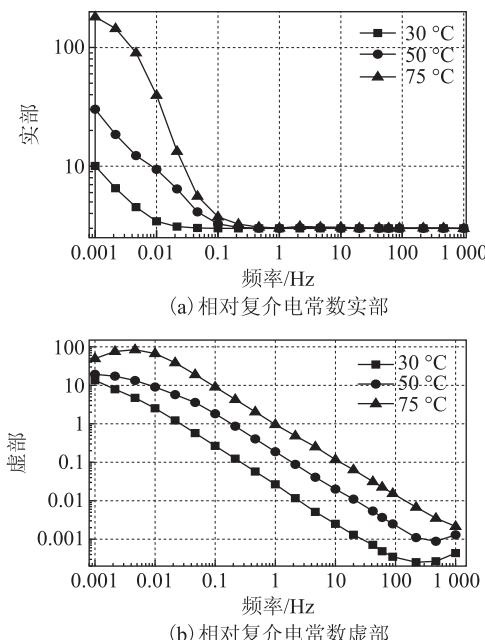


图7 不同温度、频率下油纸绝缘系统介电谱相对复介电常数

Fig. 7 Relative permittivity of dielectric constant of oil paper insulation system at different temperatures and frequency

由图7可知，随着温度的升高，油纸绝缘频域介电谱曲线向高频移动，并且在低频部分同一频率测试点的测试值亦增大，与文献[12]所述温度对油纸绝缘系统频域介电响应的影响特征一致。

依据2.2节所述测试方法与步骤，测试并计算得

到油隙、油浸纸的初始直流电导率与稳态直流电导率的平均值，分别见表1和表2。依据2.3节所述测试方法与步骤，测试并计算得到油隙与油浸绝缘纸的离子迁移率的平均值，见表3。表1~表3的试验结果是每组试验的五次测试计算结果去掉最高值与最低值，取剩余三组值得到的平均值，最大相对误差表示每组试验的五组测试计算结果与所得平均值之间的相对误差最大值。由表1~表3可知，每组试验结果的最大相对误差均在可接受范围内。

表1 油隙初始、稳态直流电导率及其误差

Tab. 1 Initial and steady DC conductivity and error of oil-gap

温度/℃	初始		稳态	
	直流电导率/(S/m)	最大相对误差(%)	直流电导率/(S/m)	最大相对误差(%)
30	3.78×10^{-12}	2.3	7.23×10^{-13}	1.9
50	2.78×10^{-11}	2.7	3.72×10^{-12}	2.1
75	1.08×10^{-10}	2.5	9.72×10^{-12}	2.3

表2 油浸纸初始、稳态直流电导率及其误差

Tab. 2 Initial and steady DC conductivity and

error of oil-immersed paper

温度/℃	初始		稳态	
	直流电导率/(S/m)	最大相对误差(%)	直流电导率/(S/m)	最大相对误差(%)
30	8.28×10^{-13}	2.6	1.23×10^{-14}	2.1
50	2.28×10^{-12}	2.3	4.83×10^{-12}	2.3
75	9.28×10^{-11}	2.2	3.83×10^{-12}	1.9

表3 油隙与油浸纸离子迁移率

Tab. 3 Ionic mobilities of oil-gap and oil-immersed paper

温度/℃	油隙		油浸纸	
	离子迁移率/[m ² /(V·s)]	最大相对误差(%)	离子迁移率/[m ² /(V·s)]	最大相对误差(%)
30	6.83×10^{-10}	1.8	2.36×10^{-10}	2.1
50	2.42×10^{-9}	2.3	1.36×10^{-9}	2.5
75	3.82×10^{-9}	2.6	2.36×10^{-9}	1.9

3.2 介电参数方程验证

本文基于建立的油纸绝缘系统低频介电参数方程进行计算，并且与2.1节所述试样在1~0.001 Hz范围内的测试结果进行对比。具体过程为：将3.1节中所示测试得到的油隙与油浸纸的相关参数(离子迁移率、扩散系数等)代入式(8)可分别得到油隙、油浸纸在1~0.001 Hz范围内的相对复介电常数计算值，然后将油隙、油浸纸相对复介电常数的计算值代入式(10)，计算过程中X、Y的值如2.1节中所述，则

可得到本文所用油纸绝缘系统在 $1 \sim 0.001$ Hz 范围内相对复介电常数计算值。图 8 为油纸绝缘系统相对复介电常数计算值与测试值, 可知, 油纸绝缘系统在 $1 \sim 0.001$ Hz 范围内各测试频率点的相对复介电常数计算值与测试值的误差均在 3% 以内, 计算值与测试值吻合较好。因此, 本文所建立的介电参数表达方程能够有效地表征变压器油纸绝缘系统频域介电响应中受电极极化影响的介电参数。

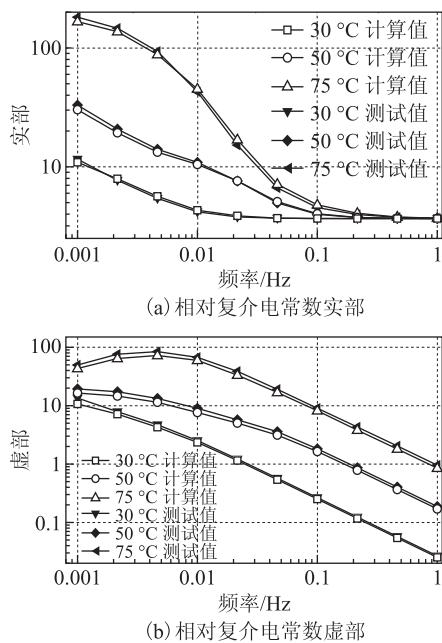


图 8 油纸绝缘系统相对复介电常数计算值与测试值

Fig. 8 Calculated and tested results of relative complex permittivity of oil paper insulation system

4 结论

为了能够更好地解析频域介电响应测试结果, 为后续研究各因素对测试结果的影响, 最终提取特征参量用于实际工程建立基础, 本文针对变压器油纸绝缘系统低频激励下的介电响应进行了研究, 得到主要结论为: 提出以电导率、离子迁移率等为参量的绝缘电介质(油隙、油浸纸)的介电参数方程, 并基于变压器油纸绝缘系统的 XY 几何等效模型, 构建并试验验证了变压器油纸绝缘系统低频介电响应模型, 油纸绝缘系统介电参数计算值与测试值相符合, 建立的介电参数方程能够有效地表征变压器油纸绝缘系统频域介电响应中低频部分的介电参数。

参考文献

- [1] 杨丽君, 高思航, 高峻, 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.
- [2] 邹阳, 蔡金锭. 油纸绝缘变压器时域极化谱特性实验分析[J]. 电工技术学报, 2015, 30(12): 307-313.
Zou Yang, Cai Jinding. Experimental analysis on time-domain polarization spectrum of oil-paper insulation transformer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(12): 307-313.
- [3] 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.
- [4] 文华, 马志钦, 王耀龙, 等. 变压器油纸绝缘频域介电谱特性的 XY 模型仿真及试验研究[J]. 高电压技术, 2012, 38(8): 1956-1964.
Wen Hua, Ma Zhiqin, Wang Yaolong, et al. Experimental investigation and XY model simulation on the frequency domain spectroscopy characteristics of transformer oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(8): 1956-1964.
- [5] Chandima E, Stanislaw M. Gubanski, Andrzej G, 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.
- [6] Gubanski S M, Boss P, Csépés G, et al. Dielectric response methods for diagnostics of power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(3): 12-18.
- [7] 刘君, 吴广宁, 周利军, 等. 变压器油纸绝缘微水扩散暂态的电介质频率响应[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 171-178.
Liu Jun, Wu Guangning, Zhou Lijun, et al. Dielectric frequency response of oil-paper composite insulation with transient moisture equilibrium[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(1): 171-178.
- [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] Setayeshmehr A, Fofana I, Eichler C, et al. Dielectric spectroscopic measurements on transformer oil-paper

- insulation under controlled laboratory conditions [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 1100-1111.
- [10] Jaya M, Geissler D, Leibfried T. Accelerating dielectric response measurements on power transformers-part I: a frequency-domain approach [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1469-1473.
- [11] Liao Ruijin, Liu Jiefeng, Yang Lijun, et al. Understanding and analysis on frequency dielectric parameter for quantitative diagnosis of moisture content in paper-oil insulation system [J]. IET Electric Power Applications, 2015, 9(3): 213-222.
- [12] Wolny S, Adamowicz A, Lepich M. Influence of temperature and moisture level in paper-oil insulation on the parameters of the Cole-Cole model [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(1): 246-250.
- [13] 高峻, 廖瑞金, 王有元, 等. 基于扩展 Debye 模型的变压器油纸绝缘老化特征量研究 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(4): 211-217.
Gao Jun, Liao Ruijin, Wang Youyuan, et al. Ageing characteristic quantities of oil-paper insulation for transformers based on extended debye model [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(4): 211-217.
- [14] Liu Jun, Zhou Lijun, Wu Guangning. Dielectric frequency response of oil-paper composite insulation with transient moisture distribution [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4): 1380-1387.
- [15] Koch M, Prevost T. Analysis of dielectric response measurements for condition assessment of oil-paper transformer insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 1908-1915.
- [16] Liao Ruijin, Liu Jiefeng, Yang Lijun, et al. Quantitative analysis of insulation condition of oil-paper insulation based on frequency domain spectroscopy [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 322-334.
- [17] Bandara K, Ekanayake C, Saha T K. Modelling the dielectric response measurements of transformer oil [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 1283-1291.
- [18] 王东阳, 周利军, 江俊飞, 等. 低频激励下油隙的电极极化建模与介电参数方程 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5950-5956.
Wang Dongyang, Zhou Lijun, Jiang Junfei, et al. Modeling the electrode polarization of oil gap under low frequency excitation and the expressions of dielectric parameters [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5950-5956.
- [19] Zhou Y, Hao M, Chen G, et al. Study of the dielectric response in mineral oil using frequency-domain measurement [J]. Journal of Applied Physics, 2014, 115(124105).
- [20] Klein R J, Zhang Shihai, Dou Shichen, et al. Modeling electrode polarization in dielectric spectroscopy: ion mobility and mobile ion concentration of single-ion polymer electrolytes [J]. The Journal of Chemical Physics, 2006, 124(144903).
- [21] 廖瑞金, 刘捷封, 吕彦东, 等. 变压器油纸绝缘含水量定量评估的频域介电特征参量研究 [J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 204-211.
Liao Ruijin, Liu Jiefeng, Li Yandong, et al. Frequency domain dielectric characteristic parameters for quantitative assessment of moisture content of oil-paper insulation in power transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(1): 204-211.
- [22] 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, 42(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, 42(1): 153-162.
- [23] 杨丽君, 徐积全, 胡恩德, 等. 绝缘油离子迁移率的测试及其特性分析 [J]. 高电压技术, 2014, 40(10): 3260-3267.
Yang Lijun, Xu Jiquan, Hu Ende, et al. Measurement of ion mobility of insulation oil and its properties analysis [J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(10): 3260-3267.
- [24] Watanabe M, Nagano S, Sanui K, et al. Ionic conductivity and mobility in network polymers from poly(propylene oxide) containing lithium perchlorate [J]. Polymer Journal, 1986, 18(11): 809-817.

作者简介

王东阳 男, 1990 年生, 博士, 研究方向为变压器绝缘老化机理及其状态评估。

E-mail: jiulingthebest@163.com

周利军 男, 1978 年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断。

E-mail: zhoulijun@swjtu.edu.cn(通信作者)

(编辑 张洪霞)