

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.08.015

超低频激励下变压器油纸绝缘的载流子浓差极化研究

余红波, 黄松波, 刘益军, 李恒真, 王云飞, 欧晓妹

(广东电网有限责任公司佛山供电局, 广东 佛山 528000)

摘要: PDC和FDS法的超低频响应油纸绝缘受潮、老化的诊断具有较好效果,研究表明,油纸绝缘电介质的超低频响应具有明显的弥散现象,针对超低频响应的机理,目前尚未统一定论;文中通过分析载流子在不同频率下迁移速度不同造成的浓差极化,推导超低频激励下油纸绝缘中的内部极化电流函数,并结合载流子移动的统计特性,构建超低频下的介电响应模型,用以解释油纸绝缘电介质响应的低频弥散现象。与实测PDC数据比较认为模型符合实际情况,表明具有统计性的载流子浓差极化可以认为是造成油纸绝缘低频弥散的主要机制。

关键词: 变压器;油纸绝缘;超低频激励;浓差极化

Study on Concentration Polarization of Oil-paper Insulation in Transformer Under Ultra-low-frequency Excitation

YU Hongbo, HUANG Songbo, LIU Yijun, LI Hengzhen, WANG Yunfei, OU Xiaomei

(Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Company, Guangdong Foshan 528000, China)

Abstract: Ultra-low-frequency response of FDS and PDC method is useful for diagnosing moisture or ageing of oil-paper insulation, and studies have shown that dispersion exists in dielectric response curves under ultra-low-frequency excitation. But there is not yet unified conclusion about the mechanism of low-frequency response. In this paper, by analyzing concentration polarization caused by carrier migration, function of polarization current under ultra-low frequency excitation is derived. Then the stochastic statistical model of carrier mobility inducing low frequency dispersion is established to explain low-frequency dispersion. By comparing with the experimental PDC data, it is found that the model conforms to the actual situation, show that: the low-frequency dispersion of oil-paper insulation are mainly caused by statistical concentration polarization.

Key words: transformer; oil-paper insulation; ultra-low-frequency excitation; concentration polarization

0 引言

电介质响应法是近年来发展起来的评估油纸绝缘状态(尤其是受潮和老化)的新方法。电介质响应法的基本思想是各向同性的电介质材料存在固有的电介质响应函数,其可作为评价电介质状态的依据。实际测试中,由于无法直接测试获得该函数,一般采用电压(return voltage measurements, RVM)或电流(polarization and depolarization current, PDC、frequency domain spectroscopy, FDS)测试结果进行等

效分析^[1-12]。

研究表明,低频响应油纸绝缘受潮和老化的诊断具有较好效果,德国斯图加特大学 M. Koch 博士研究了采用 0.1 Hz 以下的频率响应测试油纸绝缘的微水含量,发现低频频率范围越宽,其测试效果越佳^[13]。大量实验表明,低频尤其是超低频时,油纸绝缘复介电常数的实部、虚部与频率均近似服从对数的线性函数。因此一般在数学建模时,采用 K-K 模型或直接引入角频率 ω 和参数 A 、 n 构成的组成项 $A\omega^{-n}$ ^[14-17]。

针对超低频响应的机理,目前尚未统一定论。

收稿日期:2016-02-07; 修回日期:2016-03-16

基金项目:广东电网有限责任公司项目(K-GD2014-0199)。

Project Supported by Guangdong Power Grid Corporation(K-GD2014-0199).

可能的机理包括^[18-19]: ①粗糙界面机制, 即多孔介质由无数微界面构成, 电介质的整体低频响应由微界面的低频响应共同构成; ②电化学机制, 由于油纸绝缘的低频响应与燃料电池的响应过程类似, 因此有学者认为与燃料电池相同, 油纸绝缘的低频响应是一个电化学的过程, 即分子在电场作用下电离成正负离子, 进而形成离子电流; ③交流电导机制, 认为绝缘存在着直流电导和交流电导, 直流电导是瞬间电导, 交流电导与频率相关, 但既有文献尚无报道交流阻抗与电介质响应低频弥散的关系, 以及这种交流阻抗的形成机制。

低频交流阻抗实际上是一种由于载流子在不同频率下迁移速度不同造成的浓差极化, 笔者拟分析油纸绝缘电介质响应的低频弥散现象, 并通过研究油纸绝缘载流子迁移浓差极化, 揭示油纸绝缘电介质响应低频弥散的机理。

1 油纸绝缘低频电介质响应实验与研究

文中首先通过实验数据, 分析油纸绝缘电介质响应曲线中的低频弥散现象。搭建的油纸绝缘介电频谱测试平台示意图, 见图 1。试验中采用平板电极作为测试传感器, 平板电容传感器被密闭在一个透明树脂容器内, 驱动电极和感应电极分别用铜质导杆连接伸出容器以便外接测试电路, 为了保证测试过程中温度的恒定, 容器放置于温度可控的烘箱内。

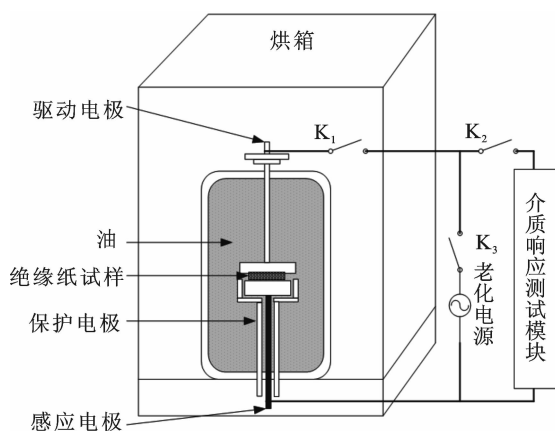


图 1 频率响应测试装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of frequency response testing device

将含有一定水分的绝缘纸放置于平板电极传感器中, 并放入变压器油进行充分浸渍。将容器放入烘箱内的温度控制在 10、30、50、70 °C, 进行电介质响应测试, 通过换算测量得到的绝缘纸和平板电容传感器组成的电容结构并联电容和相位角等特

征参数, 得到油纸绝缘的复电介常数, 见图 2。

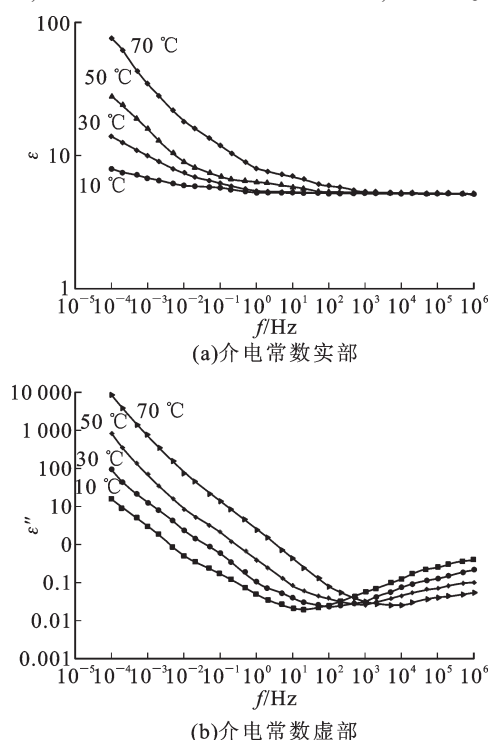


图 2 油纸绝缘复电介常数

Fig. 2 Complex permittivity of oil-paper insulation

从图 2 可以看出, 在低频尤其是超低频情况下, FDS 测试绝缘具有典型的弥散特性。

2 油纸绝缘电介质响应低频弥散的极化机制分析

2.1 多孔油纸绝缘的极化

油纸绝缘属于典型的多孔电介质, 图 3(a)和(b)为同一绝缘纸不同处的表面电镜图, 由图 3 可知: 绝缘纸(绝缘板)由纤维构成, 各纤维互相交叠。实验发现绝缘纸平行方向的电阻率比厚度方向小得多, 约 20 倍, 这也证明了绝缘纸纤维互相交叠的微观结构。由于纤维位置及方向的无序性, 导致纤维间存在很多空隙, 其空隙大小在绝缘纸各处分布不均, 而空隙的平均大小与绝缘纸的致密度相关。当与绝缘油一起构成油纸绝缘时, 绝缘油将代替空隙中的空气。

油纸绝缘在外部电场作用下发生极化, 其极化包括: 电子极化; 高分子基团、水分等杂质的偶极子极化; 绝缘油和纤维间的界面极化以及载流子在微孔通道中扩散和迁移形成的离子浓差极化(下文简称浓差极化), 离子的迁移分为慢迁移和快迁移, 快迁移过程一般不会表现为浓差极化。外部电场的频率很低时, 电子极化和偶极子极化将不受频率的影响, 而界面极化和浓差极化可能受到很大的影响。目

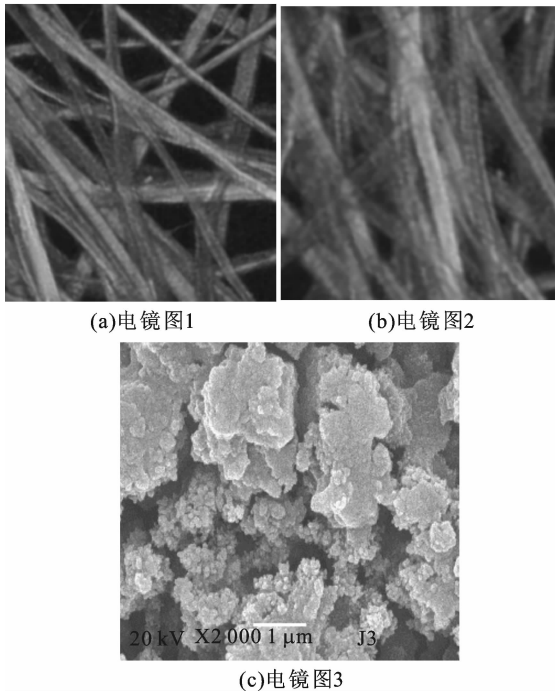


图3 绝缘纸表面电镜图

Fig. 3 The electron microscope images of surface of insulating paper

前对界面极化比较成熟,符合麦克斯韦模型,而对于油纸绝缘离子慢迁移引起的浓差极化研究甚少。

2.2 油纸绝缘中载流子的浓差极化

干燥的绝缘纸中离子数量很少,一般不予考虑,其载流子类型主要为电子。电子在电场的作用下快速移动,并定向流入电极,产生贯穿性的电流,因此由电子引起的电导是直流电导,不会造成低频响应的弥散现象。由于存在着液体电介质,油纸绝缘中将产生一定量的离子,离子的数量与杂质、水含量等均有密切关系。液体是介于气体和固体之间的一种物质状态,分子之间具有短程有序性,液体的分子在一段时间内与几个临近的分子束缚在一起,在某一个平衡位置附近作振动;而另一段时间后,分子因碰撞得到较大的动能,使它与相邻分子分开,迁移一段路径后再次被束缚。可见在液体电介质中,载流子的迁移率各处基本保持在一个数量级,因此,无论是研究还是工程中,一般不考虑迁移率在不同位置的变化。

上一节已经分析,油纸绝缘属于多孔介质,其离子的迁移与液体工程电介质中离子迁移具有本质区别。离子在油纸绝缘中的存在状态包括:①游离在绝缘油中;②吸附在绝缘纸高分子中。可见离子的迁移率与空隙的大小、绝缘纸纤维素高分子对离子的吸附能力有密切关系。因此正负离子在油纸绝缘各处的迁移率是不同的,不同位置的离子迁移

率具有随机性,下文将建立载流子迁移的统计模型,研究这种统计性与油纸绝缘低频弥散的关联性。

3 浓差极化数值模型的建立与解析

3.1 载流子慢迁移引起的浓差极化模型

下文就正负离子迁移引起的电流进行分析。假设分析对象为均匀材料,正负离子的迁移不受对方的影响,且只有一种正电荷和一种负电荷,他们引起电流密度分别为

$$\begin{cases} J_+(t) = \sigma_+ \mu_+ E(t) \\ J_-(t) = \sigma_- \mu_- E(t) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $J_+(t)$ 、 $J_-(t)$ 分别是正、负电荷迁移引起的电流密度; σ_+ 、 σ_- 分别为正、负电荷的密度; μ_+ 、 μ_- 分别为正、负电荷的迁移率; $E(t)$ 为 t 时刻的电场强度。

由于材料均匀,且在各处迁移率一致,因此电流密度各处相同。由于多孔油纸绝缘的微观特性,离子在油纸绝缘各处的迁移率差异很大,离子在绝缘纸紧致处由于纤维的作用甚至被完全束缚,即此处的电荷迁移率接近零,而在绝缘纸疏松的地方,由于受纤维素的吸附作用较弱,离子的迁移率较大,由此导致电荷在绝缘纸各处的分布会有很大差异,此时式(1)可演化为

$$\begin{cases} J_+(x, y, z, t) = \sigma_+(x, y, z, t) \mu_+(x, y, z, t) E(x, y, z, t) \\ J_-(x, y, z, t) = \sigma_-(x, y, z, t) \mu_-(x, y, z, t) E(x, y, z, t) \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, $\mu_+(x, y, z, t)$ 服从随机概率分布。

为了便于分析,把三维系统简化为 n 个独立的一维系统,设绝缘纸总面积为 A ,则一维系统截面积为 A/n 。式(2)可演化为

$$\begin{cases} J_{i+}(x, t) = \sigma_{i+}(x, t) \mu_{i+}(x, t) E_i(x, t) \\ J_{i-}(x, t) = \sigma_{i-}(x, t) \mu_{i-}(x, t) E_i(x, t) \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (3)$$

由物理意义可知,电流密度实质上也是正负电荷通流量的累加,因此参考 Fick 第一扩散定律^[20],有

$$\begin{cases} \frac{\partial[\sigma_{i+}(x, t)]}{\partial t} = -\frac{\partial[J_{i+}(x, t)]}{\partial x} \\ \frac{\partial[\sigma_{i-}(x, t)]}{\partial t} = -\frac{\partial[J_{i-}(x, t)]}{\partial x} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (4)$$

把式(3)代入式(4),得到

$$\begin{cases} \frac{\partial[\sigma_{i+}(x, t)]}{\partial t} = -\frac{\partial[\sigma_{i+}(x, t) \mu_{i+}(x, t) E_i(x, t)]}{\partial x} \\ \frac{\partial[\sigma_{i-}(x, t)]}{\partial t} = -\frac{\partial[\sigma_{i-}(x, t) \mu_{i-}(x, t) E_i(x, t)]}{\partial x} \end{cases} \quad i=1, 2, \dots, n. \quad (5)$$

考虑到离子由于热扩散而引起电荷分布变化时,式(3)应为

$$\begin{cases} J_{i+}(x, t) = -D_{i+}(x, t) \frac{\partial \sigma_{i+}(x, t)}{\partial t} + \sigma_{i+}(x, t) \mu_{i+}(x, t) E_i(x, t) \\ J_{i-}(x, t) = -D_{i-}(x, t) \frac{\partial \sigma_{i-}(x, t)}{\partial t} + \sigma_{i-}(x, t) \mu_{i-}(x, t) E_i(x, t) \end{cases} \quad (6)$$

$i=1, 2, \dots, n_0$

式(6)中: $D_{i+}(x, t)$ 、 $D_{i-}(x, t)$ 分别为正负离子在油纸绝缘中的扩散系数, 与油纸绝缘的结构、温度等有密切关系。当不考虑热扩散时, 式(6)中, $D_{i+}(x, t)$ 、 $D_{i-}(x, t)$ 均为零。

为了便于分析, 不考虑电荷不均匀分布导致内部电场的不均匀性, 式(6)可转化为

$$\begin{cases} \frac{\partial [\sigma_{i+}(x, t)]}{\partial t} = -D_{i+}(x, t) \frac{\partial^2 [\sigma_{i+}(x, t)]}{\partial x^2} - \frac{\partial [\sigma_{i+}(x, t) \mu_{i+}(x, t)]}{\partial x} E(t) \\ \frac{\partial [\sigma_{i-}(x, t)]}{\partial t} = -D_{i-}(x, t) \frac{\partial^2 [\sigma_{i-}(x, t)]}{\partial x^2} - \frac{\partial [\sigma_{i-}(x, t) \mu_{i-}(x, t)]}{\partial x} E(t) \end{cases} \quad (7)$$

$i=1, 2, \dots, n_0$

根据爱因斯坦关系式

$$\begin{cases} \frac{D_{i+}(x, t)}{\mu_{i+}(x, t)} = \frac{k_0 T}{q_+} \\ \frac{D_{i-}(x, t)}{\mu_{i-}(x, t)} = \frac{k_0 T}{q_-} \end{cases} \quad (8)$$

式(8)中: q_+ 、 q_- 分别为每个正、负离子的单位电荷量; $k_0=1.380\ 650\ 5 \times 10^{-23}$ J/K; T 为温度。

将式(8)代入式(7), 得

$$\begin{cases} \frac{\partial [\sigma_{i+}(x, t)]}{\partial t} = -\frac{k_0 T}{q_+} \mu_{i+}(x, t) \times \frac{\partial^2 [\sigma_{i+}(x, t)]}{\partial x^2} - \frac{\partial [\sigma_{i+}(x, t) \mu_{i+}(x, t)]}{\partial x} E_i(x, t) \\ \frac{\partial [\sigma_{i-}(x, t)]}{\partial t} = -\frac{k_0 T}{q_-} \mu_{i-}(x, t) \times \frac{\partial^2 [\sigma_{i-}(x, t)]}{\partial x^2} - \frac{\partial [\sigma_{i-}(x, t) \mu_{i-}(x, t)]}{\partial x} E_i(x, t) \end{cases} \quad (9)$$

$i=1, 2, \dots, n_0$

式(9)即为用于分析浓差极化的一维系统离子分布模型。假设每个离子的电荷量均为一个电子的电荷量, 则有: $q_+=q_-=1.602\ 177\ 33 \times 10^{-19}$ C。

当无外电场作用时, 整个过程为松弛过程, 即

$$\begin{cases} \frac{\partial [\sigma_{i+}(x, t)]}{\partial t} = -\frac{k_0 T}{q_+} \mu_{i+}(x, t) \times \frac{\partial^2 [\sigma_{i+}(x, t)]}{\partial x^2} \\ \frac{\partial [\sigma_{i-}(x, t)]}{\partial t} = -\frac{k_0 T}{q_-} \mu_{i-}(x, t) \times \frac{\partial^2 [\sigma_{i-}(x, t)]}{\partial x^2} \end{cases} \quad (10)$$

$i=1, 2, \dots, n_0$

正负离子的总量相同时, 一维系统正负离子电荷构成的偶极矩为

$$M_i(t) = \frac{A}{n} \int_{x=0}^L [\sigma_{i+}(x, t) - \sigma_{i-}(x, t)] x dx \quad (11)$$

$i=1, 2, \dots, n_0$

不考虑离子与电极间的电荷交换, 以及由于电极处电荷扩散引起的离子流失, 正负离子的总量相同, 则流过电极的电流为

$$I(t) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \frac{dM_{i+}}{dt} = \frac{A}{nL} \frac{d \left\{ \int_{x=0}^L [\sigma_{i+}(x, t) - \sigma_{i-}(x, t)] x dx \right\}}{dt} \quad (12)$$

$i=1, 2, \dots, n_0$

3.2 浓差极化模型的数值化解析过程

为了方便, 数值化过程将不直接基于式(9)开展, 而基于式(3)和式(4)。把一维系统分段见图 4。

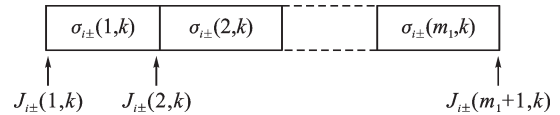


图 4 一维系统数值化过程图

Fig. 4 Numerical value process of one-dimensional system

对式(7)进行数值化处理, 得到

$$\begin{cases} J_{i+}(j, k) = -\frac{k_0 T}{q_+} \mu_{i+}(j, k) \times \frac{\sigma_{i+}(j, k) - \sigma_{i+}(j-1, k)}{h} + \mu_{i+}(j, k) \times \frac{\sigma_{i+}(j, k) + \sigma_{i+}(j-1, k)}{2} \times E_i(j, k) \\ J_{i-}(j, k) = -\frac{k_0 T}{q_-} \mu_{i-}(j, k) \times \frac{\sigma_{i-}(j, k) - \sigma_{i-}(j-1, k)}{h} + \mu_{i-}(j, k) \times \frac{\sigma_{i-}(j, k) + \sigma_{i-}(j-1, k)}{2} \times E_i(j, k) \end{cases} \quad (13)$$

$j=1, 2, \dots, m_1; k=1, 2, \dots, m_2; i=1, 2, \dots, n_0$

式(13)中, h 为厚度方向的步长。

不考虑离子与电极间的电荷交换, 以及由于靠近电极处电荷扩散引起的离子流失, 因此有边界条件

$$\begin{cases} J_{i+}(j, k) = J_{i+}(m_1+1, k) = 0 \\ J_{i-}(j, k) = J_{i-}(m_1+1, k) = 0 \end{cases} \quad (14)$$

对式(4)进行数值化处理, 得到

$$\begin{cases} \frac{\sigma_{i+}(j, k+1) - \sigma_{i+}(j, k)}{\tau} = -\frac{J_{i+}(j+1, k) - J_{i+}(j, k)}{h} \\ \frac{\sigma_{i-}(j, k+1) - \sigma_{i-}(j, k)}{\tau} = -\frac{J_{i-}(j+1, k) - J_{i-}(j, k)}{h} \end{cases} \quad (15)$$

式(15)中, τ 为时间步长。

对式(11)进行数值化处理, 得到

$$M_i(k) = \frac{A}{n} \sum_{j=1}^m [h j \sigma_{i+}(j, k) - h j \sigma_{i-}(j, k)] \quad (16)$$

对式(12)进行数值化处理,得到

$$I(k) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^n \frac{M_i(j, k+1) - M_i(j, k)}{\tau} \quad (17)$$

4 浓差极化分析与实验

4.1 局部电场的确定

式(13)中,需要确定不同时刻各点的电场强度 $E_i(j, k)$, 为此文中设计了实验, 见图 5, 把 6 张绝缘纸粘合在一起, 并在每 2 张绝缘纸间无规则地布置一些局部小电极, 然后把 6 张绝缘纸夹在 2 个电极中间; 同时测试电极两端的电压和任意两个小电极之间的电压, 并记录。

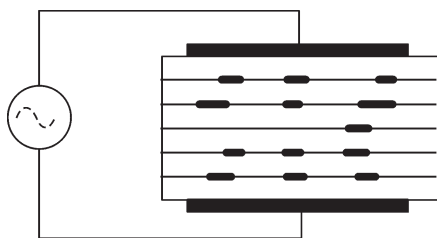


图 5 局部电场测试实验

Fig. 5 Test experiment of local electric field

实验表明: ①每张绝缘纸所承受的电压相同; ②测试结果与小电极的选取无关。因此, 认为各处的电场强度不受内部电荷分布的影响, 式(9)中各点的电场强度为

$$E_i(x, t) = E(t) = \frac{U(t)}{L} \quad i=1, 2, \dots, n_0 \quad (18)$$

式(18)中, L 为绝缘纸的厚度。

4.2 极化电流拟合与弥散验证

电场作用下正负离子的移动和载流子在油纸绝缘中的局部电荷迁移率密切相关, 由于微观结构的随机性很大, 因此离子的局部迁移率 $\mu_{i+}(x, t)$ 、 $\mu_{i-}(x, t)$ 服从一定的概率分布, 分析中, 文中不考虑局部迁移率随时间变化的情况, 且假设每个位置的局部迁移率与其他位置无关, 因为高斯分布是自然界中最常见的分布类型, 因此文中载流子局部迁移率采用服从高斯分布 $N(\mu, \sigma)$, 即

$$f(\mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp[-(\mu - \bar{\mu})^2 / (2\sigma^2)] \quad (19)$$

式(19)中, 平均载流子速度 $\bar{\mu} \geq 0$ 、载流子速度 $\mu \geq 0$ 、载流子速度的标准差 $\sigma \geq 0$ 。

一般情况下采用 PDC 来分析超低频的 FDS 特性, 文中以 PDC 测试数据为基础(测试数据包括高频阶段和低频阶段的数据), 基于式(12)和(19), 70 °C 低频段拟合得到: $\bar{\mu} = 1.8201 \times 10^{-9} \text{ m}^2/(\text{Vs})$, $\sigma = 2.5 \times 10^{-12} \text{ S/m}$, 测试曲线和低频段拟合曲线

见图 6。

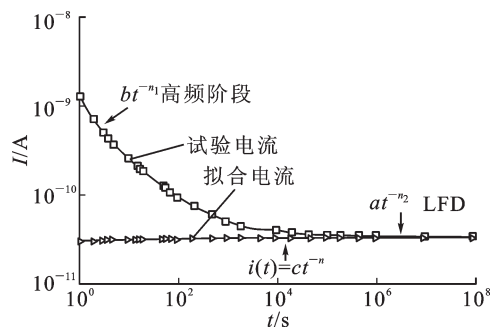


图 6 测试曲线和拟合曲线

Fig. 6 Testing curve and fitting curve

从测试和拟合均可得到, 在超低频测试阶段 $i(t) = 3 \times 10^{-11} \cdot t^{-0.02}$, 根据推导, 求得

$$\begin{cases} \log \varepsilon' \propto -0.98 \cdot \omega \\ \log \varepsilon'' \propto -0.98 \cdot \omega \end{cases} \quad (20)$$

以上结果与图 2 中保持一致。从以上结果中可以看出, 具有统计性的载流子浓差极化是造成油纸绝缘低频弥散的主要机制。

5 结语

PDC 和 FDS 法的超低频响应对油纸绝缘受潮、老化的诊断具有较好效果, 研究表明, 油纸绝缘电介质的超低频响应具有明显的弥散现象, 针对超低频响应的机理, 目前尚未统一定论, 包括粗糙界面机制、电化学机制和交流电导机制等。文中以通过分析载流子在不同频率下迁移速度不同造成的浓差极化, 推导超低频激励下油纸绝缘中的内部极化电流函数, 并结合载流子移动的统计特性, 构建超低频下的介电响应模型, 实测 PDC 数据的低频拟合表明, 缩减模型复合实际情况, 证明具有统计性的载流子浓差极化可以认为是造成油纸绝缘低频弥散的主要机制。

参考文献:

- [1] 许 渊, 刘有为, 王文焕, 等. 大型电力变压器油纸绝缘含水量的介质响应诊断技术[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(33): 133-140.
XU Yuan, LIU Youwei, WANG Wenhuan, et al. Moisture content analysis of oil-paper insulation for large power transformers using dielectric response methods[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(33): 133-140.
- [2] 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.
- [3] 王 林, 周利军, 李先浪, 等. 应用极化/去极化电流法分析油纸绝缘微水扩散暂态过程[J]. 高电压技术, 2013, 39(2): 354-359.
- WANG Lin, ZHOU Lijun, LI Xianlang, et al. Analysis of transient moisture diffusion in oil-paper insulation using polarization and depolarization current method [J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2): 354-359.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 廖瑞金, 袁 泉, 唐 超, 等. 不同老化因素对油纸绝缘介质频域谱特性的影响[J]. 高电压技术, 2010, 36(7): 1612-1618.
- LIAO Ruijin, YUAN Quan, TANG Chao, et al. Influence of different aging conditions on characteristics of frequency domain spectroscopy of oil-paper insulation medium[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(7): 1612-1618.
- [8] 江修波, 黄彦婕, 张 涛. 变压器油纸绝缘水分的回复电压分析法[J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2984-2989.
- JIANG Xiubo, HUANG Yanjie, ZHANG Tao. Return voltage method of moisture of oil-paper insulation in power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(12): 2984-2989.
- [9] 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.
- [10] BOUAICHA A, FOFANA I, FARZANEH M, et al. Dielectric spectroscopy techniques as quality control tool: A feasibility study [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2009, 25(1): 6-14.
- [11] BHUMIWAT S, LOWE S, NETHING P, et al. Performance of oil and paper in transformers based on IEC 61620 and dielectric response techniques[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2010, 26(3): 16-23.
- [12] 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.
- [13] KOCH M, PREVOST T. Analysis of dielectric response measurements for condition assessment[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(6): 1908-1915.
- [14] ZHOU Lijun, LI Xianlang, WU Guangning. Low frequency dispersion mechanism of dielectric response for oil-paper insulation diagnosis[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(8): 1873-1880.
- [15] WANG Shiqiang, ZHANG Guanjun, WEI Jianlin, et al. Investigation on dielectric response characteristics of thermally aged insulating pressboard in vacuum and oil-impregnated ambient[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(6): 1853-1862.
- [16] LIAO Ruijin, HAO Jian, YANG Lijun. Quantitative analysis of ageing condition of oil-paper insulation by frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 821-830.
- [17] LIU Jun, ZHOU Lijun, WU Guangning, et al. Dielectric frequency response of oil-paper composite insulation modified by nanoparticles[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 510-520.
- [18] SARKAR S, SHARMA T, BARAL A, et al. A new approach for determination of moisture in paper insulation of in-situ power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(6): 2325-2334.
- [19] BARAL A, CHAKRAVORTI S. A modified maxwell model for characterization of relaxation processes within insulation system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(2): 524-534.
- [20] PONTIGA F, CASTELLANOS A. Electrical conduction of electrolyte solutions in nonpolar liquids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1996, 32(4): 816-824.

余红波(1986—), 男, 工程师, 从事电力设备状态监测研究工作。