

变压器油纸绝缘交流电导特性变化规律研究

孟繁昊¹, 刘 兵¹, 邵 迪^{2*}, 王炳杰²

(1. 国家能源集团科学技术研究院有限公司武汉分公司, 湖北 武汉 430070;

2. 哈尔滨理工大学 工程电介质及其应用教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150080)

摘 要:油浸式变压器在电力系统中属于核心输变电设备,其内部油纸绝缘材料在长期运行下出现受潮、老化等劣化行为,严重威胁变压器的稳定运行。油纸绝缘复合体系的交流电导行为可有效表征绝缘的劣化程度,但传统油纸绝缘交流电导计算模型中未考虑介质内多松弛过程的影响,致使传统交流电导模型的可用性较低。本文在不同温度环境下,对老化/受潮油纸绝缘试样开展频域介电响应测试,采用弛豫及电导双平移的方式,构建符合油纸绝缘体系多松弛过程交流电导率变化特性的理论计算模型。结果表明:油纸绝缘老化后电导活化能及弛豫活化能均降低,而水分对两种活化能的影响相反;不同老化程度油纸绝缘试样在高频下的交流电导率基本重合,且中高频段存在明显转变区域,而受潮试样全频段内交流电导率曲线未出现平缓的过渡;同时采用本文提出的修正计算模型,可提高低频段交流电导率计算的准确性。

关键词:油纸绝缘;频域介电响应;交流电导率;弛豫/电导活化能

Study on variation law of AC conductivity characteristics for transformer oil-paper insulation

Meng Fanhao¹, Liu Bing¹, Shao Di^{2*}, Wang Bingjie²

(1. Wuhan Branch of National Energy Group Science and Technology Research Institute Co., Ltd.,
Wuhan 430070, China;

2. Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application Ministry of Education, Harbin University of
Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Oil-immersed power transformers are the core power transmission and transformation equipment in power systems. The internal oil-paper insulating materials of these transformers undergo deterioration such as moisture absorption and ageing during long-term operation, which seriously threatens the stable operation of the transformers. The AC conductivity behavior of oil-paper insulation composite system can effectively characterize the deterioration degree of the insulation. However, traditional AC conductivity calculation models of oil-paper insulation do not consider the effect of multiple relaxation processes in medium, resulting in low availability of these conventional models. In this paper, the frequency domain dielectric response measurements were performed on aged and damped oil-paper insulation samples at different test temperatures. A theoretical calculation model of AC conductivity variation characteristics in multiple relaxation process of oil-paper insulation system was constructed by means of relaxation and conductivity two shifting. The results show that after ageing, both the conductivity activation energy and relaxation activation energy of the oil-paper insulation decrease, while the effects of moisture on these two activation energy are opposite. The AC conductivities of oil-paper insulations with different ageing degrees at high frequency are basically consistent, and there is a significant transition area in the medium and high frequency ranges, while there is no smooth transition in the AC conductivity curve of the damped sample across the entire frequency range. Meanwhile, using the modified calculation model proposed in this paper can improve the accuracy of low-frequency AC conductivity calculation.

Key words: oil-paper insulation; FDS; AC conductivity; relaxation/conductivity activation energy

0 引言

基金项目:国家能源集团科学技术研究院有限公司武汉分公司科技项目(WH2025Y01)。

油浸式变压器在电力系统中属于核心输变电设备,其运行可靠性直接影响电网稳定性。变压器

长期运行在高温、强场、机械振动的环境下均会使其主绝缘出现不同程度的老化现象^[1-3]，同时由于密封性能下降，其内部绝缘出现受潮，会进一步加剧绝缘劣化^[4-5]，致使绝缘的可靠性大幅降低，威胁设备的稳定运行，因此准确评估变压器绝缘的劣化程度至关重要。

电力运维部门开展定期的检修计划（春检、秋检），主要是依据 GB/T 50150—2016、DL/T 596—2021 等相关要求对油浸式电力设备/组部件进行离线检测，如采用局部放电^[6]、工频耐压、工频介损、绝缘电阻、绕组变形^[7]、油中溶解气体分析^[8]、红外成像温度^[9]、绕组直流电阻等测试方法对变压器绝缘状态进行分析。根据大量现场试验统计结果可知，上述方法对于设备内出现的集中性绝缘缺陷具有较好诊断效果，而对绝缘老化、受潮等问题的量化分析仍存在局限，仅能根据出厂参数值或当前电力设备三相间相关指标（工频介损、绝缘电阻）的测试值进行定性比较。

为了评估变压器内部绝缘的老化及受潮状态，基于时域和频域的介电响应测试技术发展迅速，逐步被电力运维部门及检测机构所使用。其中，时域介电响应测试技术（TDS-TEST）与传统绝缘电阻、吸收比/极化指数的测试原理相同^[10-12]，而频域介电响应测试技术（FDS-TEST）与传统工频介电性能测试主要存在激励幅值、频谱范围、接线方式方面的差异。FDS-TEST 产生交变激励的方式与传统工频测试装备不同，其可在不改变接线方式的前提下，分别获得高低压绕组间主绝缘、高压对地绝缘及低压对地绝缘等介电特性的信息，简化现场测试流程，使得在试验室中针对试样/缩比模型的绝缘状态评估方法可以顺利扩展应用于实际的油浸式电力设备。

油纸绝缘材料频域介电性能变化信息的准确获取是变压器绝缘状态评估的关键，现阶段关于油纸绝缘频域介电特性的研究更多的倾向于对变压器油纸绝缘的复介电常数及介质损耗因数变化规律的分析。如根据损耗因数曲线，提取特征参数、特征频率段积分值等信息，或依据改进/修正的介电弛豫模型（如 Debye 模型、Cole-Cole 模型）提取模型特征参数。建立特征参数与油纸绝缘材料老化程度及水分含量的量化表征关系^[18-19]，并基于频谱测试结果，结合油浸式电力设备主绝缘等效结构模

型，采用全频段介质损耗因数的迭代对比计算或大数据学习模型训练的方式，实现变压器绝缘状态的有效评估^[20-21]。但对于油纸复合介质而言，其老化后在交变激励下油纸界面形成电荷积聚，进而出现界面极化行为使得介质损耗因数曲线变化差异明显，传统的 Debye 模型中无法有效表征多层介质的界面极化过程^[22]，而油纸界面极化过程又与交流电导行为密切相关，因此通过介质的交流电导行为可更直观地表征材料绝缘性能的变化。目前针对油纸绝缘材料交流电导特性的分析相对较少，P Zukowski 等^[23]对不同含水量油浸纸板的交流电导特性进行分析，研究发现电导率与频率的关系受到温度及偶极子弛豫时间的影响；Hao J 等^[24]研究发现水分子的迁移特性和极性老化产物与油纸绝缘的降解均会导致直流电导率和交流电导率之间的频率依赖关系发生转变，但传统的交流电导计算模型无法有效表征实际交流电导的变化规律，且在极低频激励下，交流电导率可能出现小于直流电导率的异常现象^[25]，因此研究油纸绝缘的交流电导特性具有重要意义。

基于此，本文对不同老化状态、受潮程度的油纸绝缘试样开展宽温-宽频交流电导率测试，揭示老化温度及含水量对交流电导特性的影响规律；通过频温平移及电导平移后扩展交流电导率的响应频段，揭示老化油纸绝缘弛豫活化能及电导活化能的变化规律；在考虑介质内多松弛过程的基础上，采用频率修正系数，建立可有效表征油纸绝缘材料交流电导行为的物理模型。本文的研究结果可为变压器油纸绝缘频域介电性能变化的准确表征提供理论参考，为后期依据油纸绝缘交流电导行为评估变压器绝缘状态提供一定的理论支撑。

1 频域介电响应理论分析

传统介质的复交流电导率可通过复介电常数实部与虚部进行计算，如式(1)~(2)所示。

$$\sigma'(\omega, T) = \omega \varepsilon_0 \varepsilon'_f(\omega, T) \quad (1)$$

$$\sigma''(\omega, T) = \omega \varepsilon_0 \varepsilon''_f(\omega, T) \quad (2)$$

式(1)~(2)中： σ' 和 σ'' 分别为复交流电导率实部与虚部； ε'_f 和 ε''_f 分别为复介电常数实部与虚部； ε_0 为真空介电常数； ω 为测试激励角频率； T 为测试温度。

式(1)~(2)的计算前提为介质内部仅存在单一的松弛过程，但介质内部在极化建立时存在多个

松弛过程,如果简单地采用式(1)~(2)进行复交流电导率计算,会出现极低频激励下的复交流电导率实部值小于直流电导率的情况。在考虑介质内偶极子在不同瞬间的本征松弛时间后,由传统 Debye 方程可推广得到 Schweider 方程,如式(3)~(4)所示。

$$\varepsilon_f' = \varepsilon_\infty + (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \int_0^\infty \frac{f(\tau)}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau$$

(3)

$$\varepsilon_f'' = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \int_0^\infty \frac{f(\tau) \omega \tau}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau$$

(4)

式(3)~(4)中: $f(\tau)$ 为松弛时间 τ 的概率分布函数; ε_s 和 ε_∞ 分别为稳态及光频介电常数。

式(3)~(4)中未考虑直流分量的影响,仅可表征介质的极化行为。由于松弛时间 τ 的概率分布函数 $f(\tau)$ 无法确定,因此需采用其他方法对交流电导率进行修正。

2 试验设计及结果分析

2.1 油纸绝缘材料老化试验设计及 FDS 测试

本文采用魏德曼生产的厚度为 1 mm 的绝缘纸板及中石油生产的 45# 环烷基绝缘油开展试验,试验前对绝缘油及绝缘纸板进行真空干燥(在 105℃ 真空环境下保持 16 h,常温下静置 24 h)。

聚合度(DP)是一个衡量绝缘纸板中纤维素分子链大小/聚合程度的重要指标,其可用于评估主绝缘内纸板的老化程度,DP 值越小,材料的老化程度越高,绝缘性能越差。油浸纸板的聚合度可以通过 IEC 60450:2007 中的粘均聚合度方法得到,本文使用的油浸纸板聚合度值如表 1 所示。

表 1 不同老化程度试样的聚合度

Table 1 DP of samples with different ageing degree						
老化时间/d	0	5	10	30	45	90
DP	1 000	867	675	502	466	307

采用 Keithley 公司生产的 6517B 型静电计对绝缘材料的极化电流过程(PDC)进行测试,以获得长松弛时间下的直流电导率。采用 Megger 公司生产的 IDAX-300 型绝缘诊断分析仪,分别对试样在不同温度下(30、50、70℃)进行频域介电谱(FDS)测试,获得相应的 FDS 曲线(频率范围为 10⁻³~10⁴)。

本研究以 130℃ 作为加速热老化温度,开展加速老化试验,并对不同老化程度试样进行加速吸潮,控制试样的含水率为 0.8%~5.4%。对上述制备的试样开展介电响应测试(直流电导及 FDS),每次

试验前进行试样短接放电,测试时每个试样在 1 个测试温度下测试 3 次,并将 3 次测试结果的平均值作为测试结果,测试平台如图 1 所示。

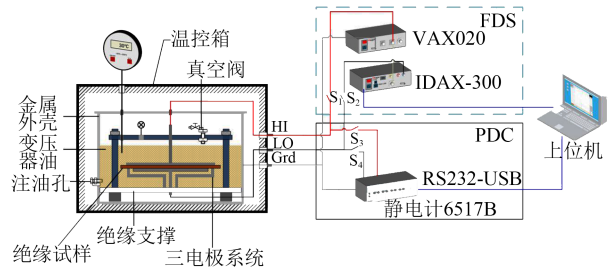
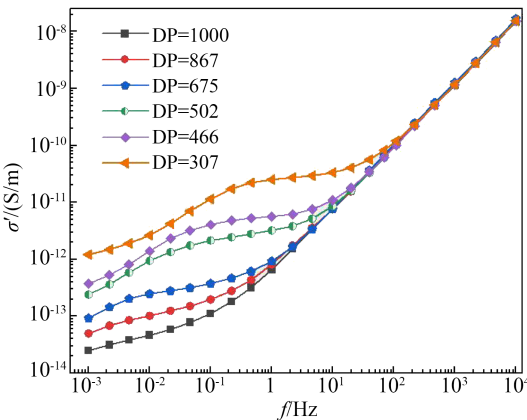


图 1 测试平台示意图

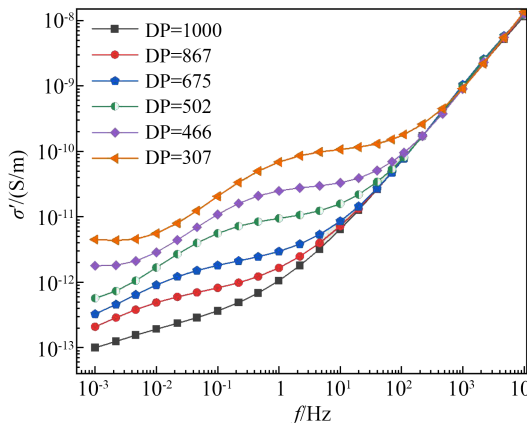
Fig.1 Schematic diagram of testing platform

2.2 交流电导率变化规律

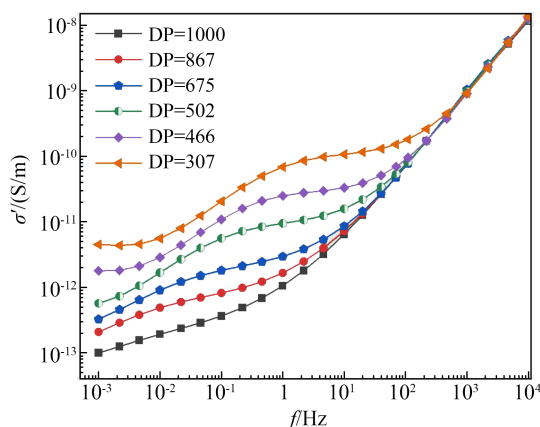
对于油纸绝缘材料的复交流电导率而言,其实部曲线能够直接表征材料极化过程的损耗特性,因此本文采用式(1)来计算油纸绝缘试样的复交流电导率实部(由于本文侧重于复交流电导率实部的分析,为论述方便,后文将复交流电导率实部称为交流电导率),不同老化程度和不同受潮程度试样的交流电导率曲线分别如图 2 和图 3 所示。



(a) 测试温度为 30℃



(b) 测试温度为 50℃

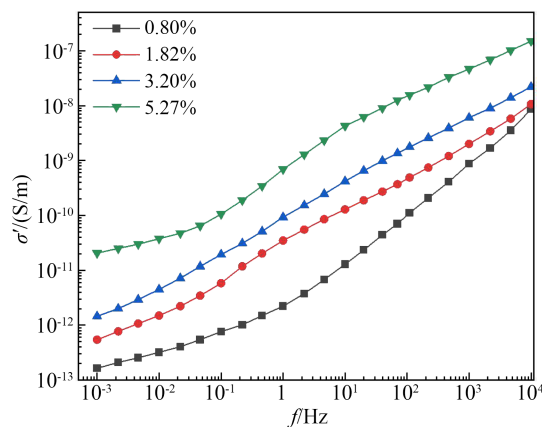


(c) 测试温度为 70°C

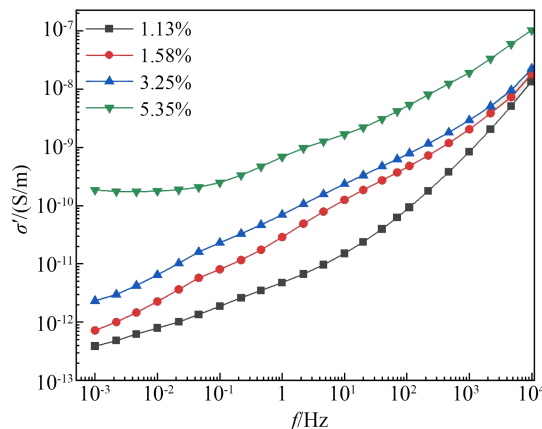
图2 不同老化程度试样在不同测试温度下的交流电导率曲线

Fig.2 AC conductivity curves of samples with different ageing degrees at different test temperatures

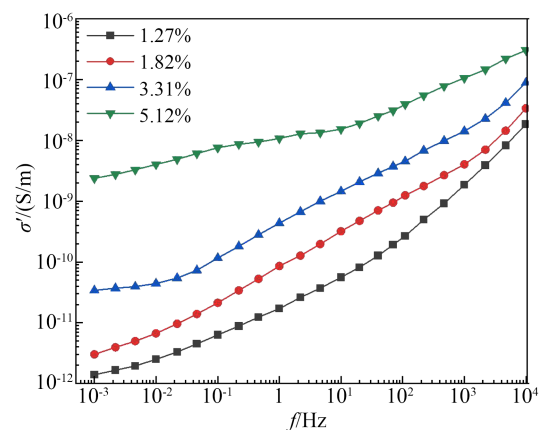
从图2可以看出,当测试温度上升或材料发生老化时,测试频段内的交流电导率数值明显增加。在高频(1 000~10 000 Hz)激励条件下,介质内部的偶极子转向速度难以跟上电场频率的变化速度,导致极化过程难以充分形成。此时交流电导率与测试频率在log坐标系下呈线性关系,且不同老化程度的测试曲线逐渐趋于一致。随着频率的降低,电介质中极化行为所需的时间与施加电场的频率相似,从而在交变电场作用下出现弛豫极化现象。宏观上,表现为交流电导率曲线的斜率出现显著变化,曲线呈现出一个拐点。当测试温度较高时,电介质中的热运动加剧,弛豫时间缩短,拐点所处的频率就越向更高频率移动。在低频(0.01~1 Hz)测试条件下,试样的交流电导率与频率的关联性较



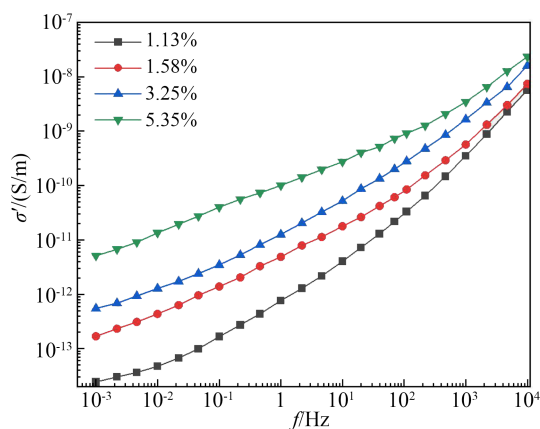
(b) 测试温度为 70°C (DP=1 000)



(c) 测试温度为 30°C (DP=307)



(d) 测试温度为 70°C (DP=307)



(a) 测试温度为 30°C (DP=1 000)

图3 不同老化程度试样在不同测试温度及水分含量下的交流电导率曲线

Fig.3 AC conductivity curves of samples with different ageing degrees at different test temperatures and moisture contents

低,此时其主要受直流电导作用影响;随着频率的升高,直流电导的贡献逐渐降低,交流电导率曲线呈现平缓上升的态势。

从图3可以看出,当水分含量增加后,试样在全频段内的交流电导率均增加,测试温度升高及老化程度增大均使得试样在全频段内的交流电导率增加。

2.3 介电弛豫活化能与电导活化能分析

由高分子物理理论可知,介质材料在高温、高频下的介电响应行为与低温、低频下是等效的,因此可通过不同温度测试的FDS曲线计算材料的弛豫活化能(ΔE_r),如式(5)所示。

$$\Delta E_r = \frac{k}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} (\ln f(T_2) - \ln f(T_1)) \quad (5)$$

式(5)中: $f(T_2)$ 为所需平移到 T_2 温度下的频率,Hz; $f(T_1)$ 为测试频率,Hz; T_1 为测试温度,K; T_2 为需要平移到的温度,K; k 为玻尔兹曼常数。

考虑到介质材料电导率与测试温度的关系符合 Arrhenius 方程,因而可由式(6)计算介质的电导活化能(ΔE_c)。

$$\Delta E_c = \frac{k}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)} (\ln \sigma(T_2) - \ln \sigma(T_1)) \quad (6)$$

式(6)中: $\sigma(T_1)$ 为温度为 T_1 条件下的电导率,S/m; $\sigma(T_2)$ 为温度为 T_2 下的电导率,S/m。

采用式(5)和式(6)计算试样的弛豫活化能及电导活化能,结果如表2~4所示。

表2 不同老化程度试样的弛豫活化能及电导活化能

Table 2 Relaxation activation energy and conductivity activation energy of sample with different ageing degrees

老化程度	弛豫活化能/eV	电导活化能/eV
DP=1 000	0.856	0.826
DP=867	0.849	0.817
DP=675	0.743	0.687
DP=502	0.682	0.650
DP=466	0.611	0.572
DP=307	0.538	0.561

表3 不同水分含量未老化试样的弛豫活化能及电导活化能

Table 3 Relaxation activation energy and conductivity activation energy of unaged samples with different moisture contents

水分含量/%	弛豫活化能/eV	电导活化能/eV
0.80	0.865	0.833
1.80	0.912	0.895
3.20	0.956	0.912
5.27	0.988	0.958

表4 不同水分含量老化试样的弛豫活化能及电导活化能 (DP=307)

Table 4 Relaxation activation energy and conductivity activation energy of aged samples with different moisture contents(DP=307)

水分含量/%	弛豫活化能/eV	电导活化能/eV
1.13	0.511	0.493
1.58	0.537	0.519
3.25	0.594	0.556
5.35	0.621	0.593

从表2~4可以看出,随着油纸绝缘材料老化程度增加,试样的弛豫活化能及电导活化能减小,而水分含量增加使得试样的弛豫活化能及电导活化能增大。

本文以不同老化程度油纸绝缘试样为例,对其交流电导率曲线进行弛豫平移及电导平移归算,平移归算后的交流电导率曲线如图4所示。从图4可以看出,曲线最低频点为 10^{-5} Hz数量级,且在极低频下交流电导率曲线变化趋势趋于平缓,极低频段下的交流电导率可等效视为直流电导率,后续可以以此作为修正依据。

2.4 交流电导率计算模型的修正方法

对不同老化程度试样进行直流电导率测试,测试结果如表5所示,而采用弛豫平移和电导平移的方法,得到极低频电导率如表6所示,为论述方便将其定义为视在直流电导率。

在传统单一松弛时间 Debye 模型中,考虑直流分量影响时,交流电导率可表示为式(7)。

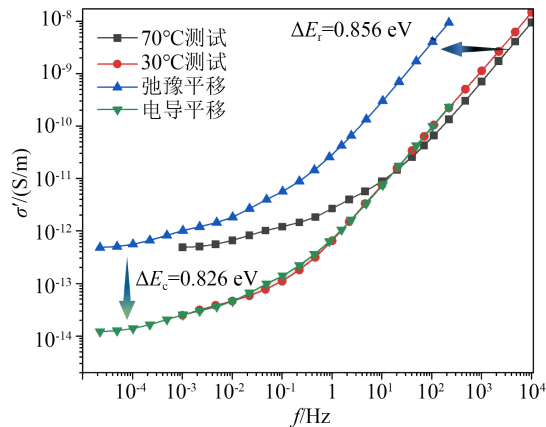
$$\gamma + g = \frac{\omega^2 \tau \epsilon_0 (\epsilon_s - \epsilon_\infty)}{1 + \omega^2 \tau^2} = \omega \epsilon_0 \epsilon'' \quad (7)$$

式(7)中: γ 为交流电导率中的直流分量(直流电导率),S/m; g 为交流电导率中的极化分量,S/m。

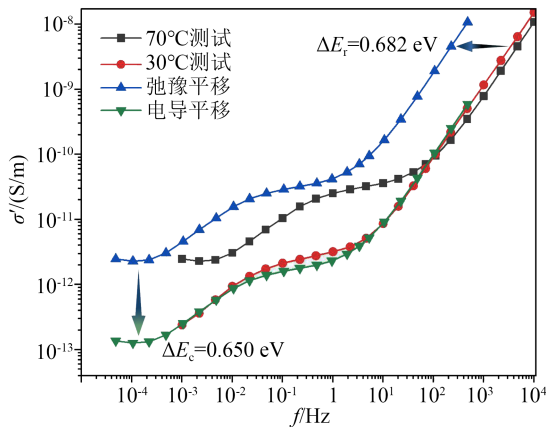
对比表5和表6可以看出,实测的直流电导率大于计算获得的视在直流电导率,由于传统单一松弛时间下的 Debye 模型无法全面表征介质的交流电导率特性,可采用松弛时间分布函数对其进行修正,此时交流电导率可表示为式(8)。

$$\gamma + g = \epsilon_0 (\epsilon_s - \epsilon_\infty) \int \frac{\omega^2 f(\tau)}{1 + \omega^2 \tau^2} d\tau \quad (8)$$

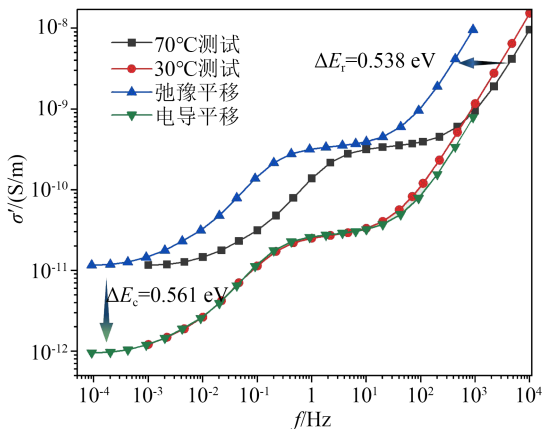
由于松弛时间 τ 的概率分布函数 $f(\tau)$ 无法确定,本文在传统电导率计算模型中的频率部分增加了表示分散程度的参数 $1-\alpha$ 。通过频温平移及电导平移的方法获得极低频下的交流电导率,极低频下的



(a) DP=1 000



(b) DP=502



(c) DP=307

图4 不同老化程度试样的交流电导率平移扩展曲线
Fig.4 Translation extension curves of AC conductivity at different ageing degrees

视在直流电导率($\omega^{1-\alpha}\epsilon_0\epsilon''$)认定为直流电导率(γ)。根据式(7)可知,在单松弛时间下的传统模型中,低频下的 $\omega\epsilon_0\epsilon''$ 的值为视在直流电导率(γ_0)。通过上述提到的关系作比值可获得参数 $1-\alpha$ 的表达式如式(9)所示,交流电导率公式(1)可修正为式(10)。其修正思想与Cole-Cole、Davidson-Cole、Havriliak-Ne-

表5 不同老化程度试样在不同测试温度下的
直流电导率测试结果

Table 5 DC conductivity test results of samples with different ageing degrees at different test temperatures

老化程度	直流电导率/(S/m)		
	30℃	50℃	70℃
DP=1 000	6.65×10^{-14}	3.84×10^{-13}	1.03×10^{-12}
DP=867	8.37×10^{-14}	5.37×10^{-13}	1.93×10^{-12}
DP=675	2.16×10^{-13}	7.75×10^{-13}	2.38×10^{-12}
DP=502	5.21×10^{-13}	1.58×10^{-12}	3.02×10^{-12}
DP=466	1.46×10^{-12}	3.62×10^{-12}	1.04×10^{-11}
DP=307	4.05×10^{-12}	8.23×10^{-12}	2.16×10^{-11}

表6 不同老化程度试样在不同测试温度下的视在
直流电导率测试结果

Table 6 Apparent DC conductivity test results of samples with different ageing degrees at different test temperatures

老化程度	视在直流电导率/(S/m)		
	30℃	50℃	70℃
DP=1 000	1.21×10^{-14}	9.95×10^{-14}	4.51×10^{-13}
DP=867	1.80×10^{-14}	1.87×10^{-13}	8.02×10^{-13}
DP=675	4.72×10^{-14}	2.67×10^{-13}	9.86×10^{-13}
DP=502	1.21×10^{-13}	5.48×10^{-13}	1.27×10^{-12}
DP=466	3.73×10^{-13}	1.48×10^{-12}	5.09×10^{-12}
DP=307	1.21×10^{-12}	3.51×10^{-12}	1.07×10^{-11}

gami的建立方式相符合,均通过形状参数改变曲线偏离程度,以此表征介质内多弛豫的分布过程,因而在测试频段内本文提出的修正交流电导率模型均适用。不同老化程度试样在不同测试温度下的修正系数计算结果如表7所示。

$$1-\alpha=\log\left(\frac{\gamma}{\gamma_0}\right)/\log(\omega)+1\tag{9}$$

$$g=\omega^{(1-\alpha)}\epsilon_0\left(\epsilon''-\frac{\gamma}{\omega^{(1-\alpha)}\epsilon_0}\right)\tag{10}$$

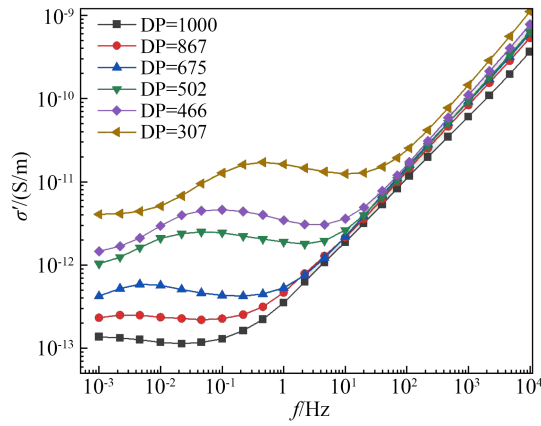
表7 不同老化程度试样在不同测试温度下的
频率修正系数

Table 7 Frequency correction factor of samples with different ageing degrees at different test temperatures

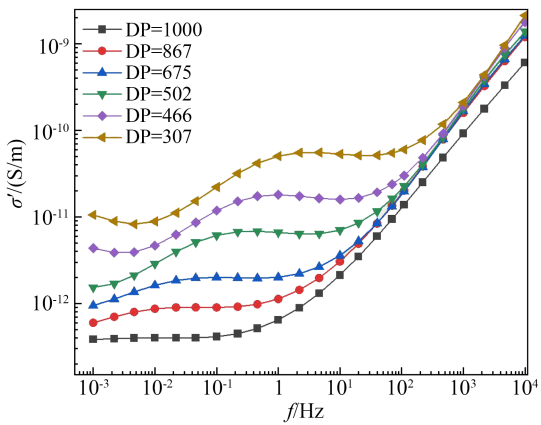
老化程度	频率修正系数		
	30℃	50℃	70℃
DP=1 000	0.663 898	0.733 626	0.837 107
DP=867	0.696 863	0.791 930	0.826 787
DP=675	0.704 808	0.789 815	0.849 007
DP=502	0.711 203	0.791 138	0.829 140
DP=466	0.730 839	0.823 579	0.859 064
DP=307	0.761 711	0.831 915	0.861 446

由表7可知,随着测试温度及老化程度的增加,试样的修正系数逐渐增大。以不同测试温度下老化、受潮试样的交流电导率为基础,对考虑多松弛过程的交流电导率进行计算,结果如图5和图6所示。

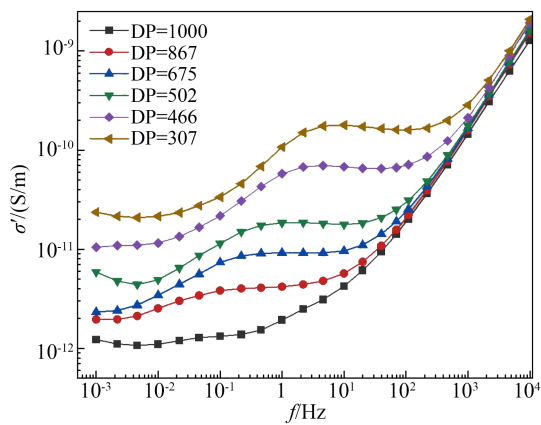
从图5可以看出,测试温度升高或油浸纸板老化后,试样的交流电导率均增加,这是由于老化试样内部的纤维素分子解裂,产生化学衍生物,使得介质中的载流子的浓度增加,而测试温度升高后载流子运动加快,因此交流电导率增大。同时由于单一的松弛过程将掩盖中低频处的极化特性,在多松弛过程的影响下,修正后曲线在低频激励下较未修正曲线更平缓,即低频激励下交流电导率的频率依赖性减弱,介质内直流电导分量占据主导。同时高



(a) 测试温度为30℃



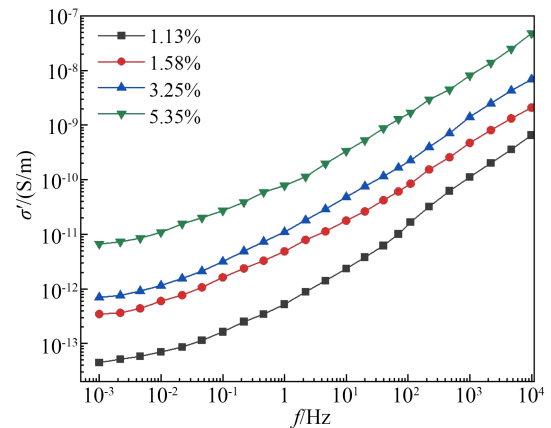
(b) 测试温度为50℃



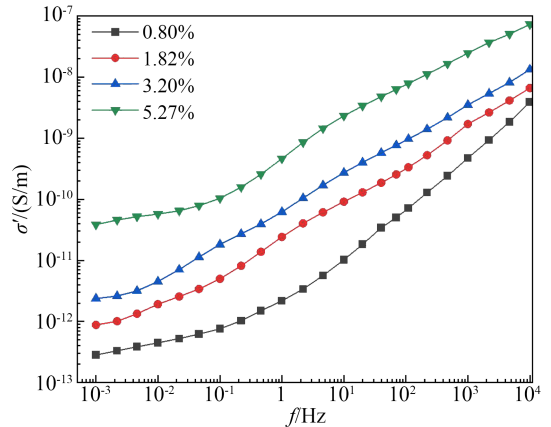
(c) 测试温度为70℃

图5 不同老化程度试样在不同测试温度下修正计算的交流电导率曲线

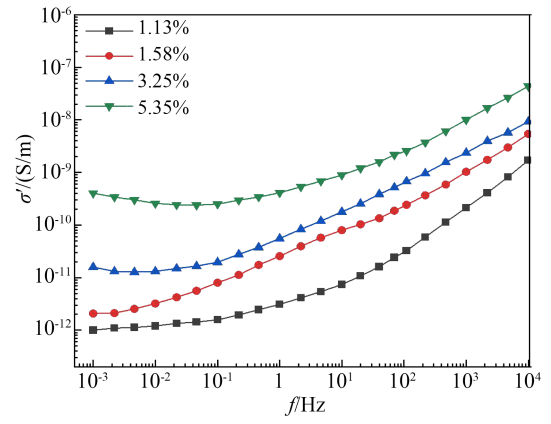
Fig.5 Corrected calculation of AC conductivity curves of samples with different ageing degrees at different test temperatures



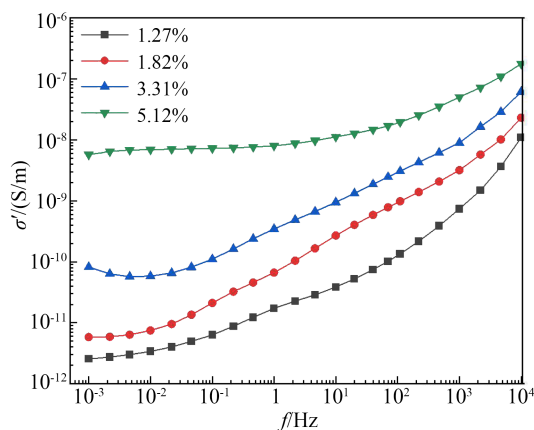
(a) 测试温度为30℃(DP=1 000)



(b) 测试温度为70℃(DP=1 000)



(c) 测试温度为30℃(DP=307)



(d)测试温度为70℃(DP=307)

图6 不同老化程度试样在不同测试温度及水分含量下修正计算的交流电导率曲线

Fig.6 Corrected calculation of AC conductivity curves of samples with different ageing degrees at different test temperatures and moisture contents

频段曲线形状变化不明显,测试的高频部分更接近于单一松弛过程(最高测试频率时介质内部仍以偶极子转向极化过程为主)。

从图6可以看出,由于水分子为强极性分子,水分含量增加使得油纸界面的极化强度增加(界面极化主要出现在低频范围),介质内导电能力增强。因此水分含量增加,交流电导率曲线在低频段变化更大,且由于水分含量的增加,高频段交流电导率曲线重合度降低。

考虑到传统模型的误差主要出现在低频段,为了验证改进模型的准确性,根据式(11)得到单松弛时间下交流电导极化分量 g_1 ;针对多松弛时间时的介质极化过程,采用复介电常数虚部的经验公式(如式(12)所示)得到多松弛时间下交流电导极化分量 g_2 ,并结合直流电导率,分别采用修正前后的交流电导率计算模型,理论计算低频下的复介电常数虚部参数。

$$g_1 = \frac{\varepsilon_0(\varepsilon_s - \varepsilon_\infty)\omega^2\tau}{1 + \omega^2\tau^2} \quad (11)$$

$$g_2 = (\varepsilon_s - \varepsilon_\infty) \frac{\omega(\omega\tau)^{1-\eta}\varepsilon_0 \cos \frac{\pi\eta}{2}}{1 + 2(\omega\tau)^{1-\eta} \sin \frac{\pi\eta}{2} + (\omega\tau)^{2(1-\eta)}} \quad (12)$$

式(12)中, η 为弛豫时间的分散程度。

以测试温度为30℃、DP值为1 000、307的两组未受潮油纸绝缘试样为例,考虑到直流电导率对传统电导率误差主要出现在低频段,计算时仅选取的

特征频段为0.001~1 Hz,计算结果如表8和表9所示。从表8和表9可以看出,改进后模型的相对计算误差远小于传统计算模型,且传统交流电导率计算模型的计算误差随着测试频率的增加而逐渐减小,其主要原因为测试频率升高后,直流电导率的影响被频率变化所掩盖,根据对比进一步证明了本文改进后交流电导计算模型的优越性。

表8 DP=1 000时两种电导率模型下的对比计算结果

Table 8 Comparative calculation results under two conductivity models(DP=1 000)

f/Hz	实测值 ε''	传统模型 计算 ε''	传统模型相 对误差/%	改进模型 计算 ε''	改进模型相 对误差/%
0.001	0.448	1.476	229.5	0.368	17.8
0.002 2	0.258	0.839	225.2	0.199	22.9
0.004 6	0.150	0.452	201.3	0.137	8.7
0.01	0.083	0.216	160.2	0.085	2.4
1	0.012	0.002	83.3	0.014	16.7

表9 DP=307时两种电导率模型下的对比计算结果

Table 9 Comparative calculation results under two conductivity models(DP=307)

f/Hz	实测值 ε''	传统模型 计算 ε''	传统模型相 对误差/%	改进模型 计算 ε''	改进模型相 对误差/%
0.001	21.796	79.255	263.6	23.678	8.6
0.002 2	12.162	39.896	228.0	14.383	18.2
0.004 6	7.422	20.254	172.9	8.705	17.3
0.01	4.747	9.504	100.2	4.915	3.5
1	0.452	0.095	79.0	0.382	15.5

现阶段对于中高频计算结果的准确度无法有效验证,这主要由于没有一个准确的“参考点”(极低频下有直流电导率可作为有效参考),传统交流电导模型也无法进行验证,但根据作者研究可知,本文试验中的最高频率相对于可表征介质宽频的介电测试而言仍较低,因此在本试验的测试频段范围内可认为修正模型已经较为准确,这也是本试验中的一个局限性。

3 结论

本文针对油纸绝缘开展了交流电导特性影响规律的试验研究,明确了老化、受潮对油纸绝缘材料的交流电导特性的影响规律,具体结论如下:

(1)对于老化试样,随着测试温度升高,交流电导率曲线的转变区域向高频方向移动,而高频段曲线基本重合;对于受潮试样,全频段内交流电导率

曲线未出现平缓的过渡。

(2)提出采用弛豫平移及电导平移方式,可扩展频段范围,且随着油纸绝缘劣化逐渐严重,其弛豫活化能及电导活化能显著减小,而水分含量的增加使得弛豫活化能及电导活化能增大。

(3)构建了符合油纸绝缘体系多松弛过程交流电导率变化特性的理论计算模型,且随着测试温度的升高交流电导率模型的修正系数增大。该模型在低频段可显著减少计算误差。

参考文献 References

- [1] 齐金平,李鸿伟,何鹏,等.牵引变压器油纸绝缘老化机理与寿命预测方法综述[J].绝缘材料,2023,56(9):14-22.
Qi Jinping, Li Hongwei, He Peng, et al. Review on ageing mechanism and life prediction method of oil-paper insulation for traction transformer[J]. Insulating Materials,2023,56(9):14-22.
- [2] 王一帆,李长云.变压器油浸绝缘纸老化阶段判别方法的研究进展[J].齐鲁工业大学学报,2018,32(6):18-24.
Wang Yifan, Li Changyun. Advances in identification method of aging stage of oil-immersed insulation paper in power transformer [J]. Journal of Qilu University of Technology,2018,32(6):18-24.
- [3] 廖瑞金,杨丽君,郑含博,等.电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J].电工技术学报,2012,27(5):1-12.
Liao Ruijin, Yang Lijun, Zheng Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(5):1-12.
- [4] 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.
Zhang Daning, Bai Fan, Niu Chaobin, et al. Frequency domain spectroscopy characteristics of oil-paper insulated bushings under different damp types[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(16):4942-4950,4998.
- [5] 张荣伦,吴佳穗,管紫璇,等.基于弛豫时间分布函数的油纸绝缘老化状态研究[J].绝缘材料,2024,57(8):82-91.
Zhang Ronglun, Wu Jiasui, Guan Zixuan, et al. Research on ageing state of oil-paper insulation based on relaxation time distribution function[J]. Insulating Materials,2024,57(8):82-91.
- [6] 周远翔,李永印,陈健宁,等.基于局部放电相位图谱和油中溶解气体信息融合的油纸绝缘缺陷识别方法[J].绝缘材料,2023,56(12):43-53.
Zhou Yuanxiang, Li Yongyin, Chen Jianning, et al. Defect recognition method of oil-paper insulation based on information fusion of PRPD spectrum and dissolved gas data[J]. Insulating Materials,2023,56(12):43-53.
- [7] 张海军,王曙鸿,刘艳琴.FRA法检测电力变压器绕组变形的试验研究[J].高压电器,2017,53(12):157-162.
Zhang Haijun, Wang Shuhong, Liu Yanqin. Experimental study on FRA based detection of transformer winding deformation[J]. High Voltage Apparatus,2017,53(12):157-162.
- [8] 罗传仙,朱晔,周正钦,等.高热故障下变压器油纸绝缘系统的产气机理研究[J].绝缘材料,2024,57(5):86-94.
Luo Chuanxian, Zhu Ye, Zhou Zhengqin, et al. Study on gas production mechanism of transformer oil-paper insulation system under high thermal fault[J]. Insulating Materials,2024,57(5):86-94.
- [9] 王姿尧,梁惠施,王薇,等.基于红外图像数据域转化和Inception-CNN网络的变压器套管在线异常识别方法[J].高电压技术,2023,49(8):3425-3436.
Wang Ziyao, Liang Huishi, Wang Wei, et al. Online identification method for transformer bushing anomaly based on data domain transformation of thermal images and inception-CNN network[J]. High Voltage Engineering,2023,49(8):3425-3436.
- [10] Zhuang Y, Wang Y H, Wang M Y, et al. Aging assessment method of oil-paper composite insulation based on repeated polarization current characteristics[J]. IET Science, Measurement & Technology,2021,16(1):59-68.
- [11] Mishra D, Haque N, Baral A, et al. Effect of charge accumulated at oil-paper interface on parameters considered for power transformer insulation diagnosis[J]. IET Science, Measurement & Technology,2018,12(3):411-417.
- [12] 周凯,李明志,饶显杰,等.基于极化-去极化电流法的变压器油纸绝缘低频介电损耗特性分析[J].高电压技术,2020,46(8):2830-2838.
Zhou Kai, Li Mingzhi, Rao Xianjie, et al. Analysis of low-frequency dielectric loss characteristics of oil-paper insulation polarization and depolarization current method [J]. High Voltage Engineering,2020,46(8):2830-2838.
- [13] 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.
Zhang Daning, Liang Zhaojie, Li Xuan, et al. Nonlinear characteristics of dielectric response and identification method of moisture and aging of oil-paper insulated bushing[J]. Electric Machines and Control,2022,26(6):18-30.
- [14] 潘志城,楚金伟,张晋寅,等.提高试验电压对抑制高压交流油纸绝缘套管频域介电谱测试电磁干扰影响的研究[J].电瓷避雷器,2021(2):66-71.
Pan Zhicheng, Chu Jinwei, Zhang Jinyin, et al. Improving test voltage to suppress influence of electromagnetic interference in frequency domain dielectric spectrum test of high voltage AC oil-paper insulated bushing[J]. Insulators and Surge Arresters,2021(2):66-71.
- [15] Du Y Y, Yang L J, Wang Y 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.
- [16] 张涛,刘雅琴,杨文雁,等.基于频域介电积分谱分析变压器油纸绝缘状态的研究[J].电机与控制学报,2019,23(7):72-78.
Zhang Tao, Liu Yaqin, Yang Wenyan, et al. Research on oil-paper insulation based on the integral of frequency domain spectrum[J]. Electric Machines and Control,2019,23(7):72-78.
- [17] Zhang T, Wang S, Zhang C, et al. Investigating a new approach

- for moisture assessment of transformer insulation system[J]. IEEE Access, 2020, 88: 1458-81467.
- [18] Xie J C, Dong M, Xu G H, et al. Quantitative aging assessment method for cellulose pressboard based on the interpretation of the dielectric response mechanism[J]. Cellulose, 2020, 27(8): 1-13.
- [19] 许敏虎, 张健, 李中原, 等. 基于 Dissado-Hill 弛豫模型的油纸绝缘老化状态评估方法研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(1): 82-90.
- Xu Minhu, Zhang Jian, Li Zhongyuan, et al. Study on ageing state evaluation method of oil-paper insulation based on Dissado-Hill relaxation model[J]. Insulating Materials, 2025, 58(1): 82-90.
- [20] Liu J F, Fan X H, Zhang C H, et al. Moisture diagnosis of transformer oil-immersed insulation with intelligent technique and frequency-domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2021, 17(7): 4624-4634.
- [21] 刘骥, 张明泽, 赵春明, 等. 基于频域介电响应分频段优化计算的变压器油纸绝缘老化参数定量计算方法[J]. 电工技术学报, 2020, 35(9): 2020-2031.
- Liu Ji, Zhang Mingze, Zhao Chunming, et al. Quantitative calculation method of transformer oil-paper insulation aging parameters based on frequency dielectric spectrum frequency range optimized calculation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9): 2020-2031.
- [22] 金维芳. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997: 75-76.
- Jin Weifang. Dielectric physics[M]. Beijing: China Machine Press, 1997: 75-76.
- [23] Zukowski P, Kierczynski K, Koltunowicz T N, et al. AC conductivity measurements of liquid-solid insulation of power transformers with high water content[J]. Measurement, 2020, 165: 108194.
- [24] Hao J, Dai X Z, Yang L J, et al. Physical mechanism analysis of conductivity and relaxation polarization behavior of oil-paper insulation based on broadband frequency domain spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(5): 1571-1578.
- [25] Badicu L V, Gorgan B, Dumitran L M, et al. Assessment of transformer mineral oil condition based on dc and ac conductivity[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(5): 1544-1551.

收稿日期: 2023-08-25; 修回日期: 2023-10-31。

作者简介:

孟繁昊(1997-), 男(汉族), 黑龙江哈尔滨人, 工程师, 主要从事电气设备性能检测、故障诊断及状态评价;

通信作者: 邵迪(1999-), 男(汉族), 河南平舆人, 硕士生, 主要从事高压电器设备绝缘诊断的评估。