

变压器油纸绝缘非线性介电弛豫模型构建方法研究

曲利民¹, 张健¹, 孟繁昊², 张亮¹, 张朋¹, 宫铭辰¹, 于沐禾²

(1. 国网黑龙江电力有限公司电力科学研究院, 黑龙江 哈尔滨 150030;

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: 基于频域介电响应(FDS)对变压器油纸绝缘状态进行检测时,油纸绝缘频域介电响应的非线性变化会影响绝缘评估的准确性,因此亟须开展不同老化程度油纸绝缘材料FDS非线性变化规律的研究。在实验室环境下制备了多组不同老化程度的油纸绝缘模型,并在不同温度下对油纸绝缘非线性FDS进行测试。结果表明:测试激励幅值越大,FDS曲线在低频段降低越明显,且随着测试温度的升高及老化程度的增加,介质损耗因数曲线出现非线性变化的特征频段向高频方向移动;本文基于修正的Davidson-Cole模型,通过曲线拟合计算得到模型中的形状参数,并以此建立基于传递函数的等效电路模型,仿真计算得到了油纸绝缘阻抗模值非线性的变化规律。根据仿真结果可知,各阶阻抗模型的电路参数与油纸绝缘介电特性非线性的变化规律密切相关,而阻抗的改变使得曲线在相应频段发生变化。

关键词: 油纸绝缘;老化;非线性介电特性;扩展Davidson-Cole模型

中图分类号: TM85 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2024.03.010

Research on construction method of nonlinear dielectric relaxation model for transformer oil-paper insulation

QU Limin¹, ZHANG Jian¹, MENG Fanhao², ZHANG Liang¹,
ZHANG Peng¹, GONG Mingchen¹, YU Muhe²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Heilongjiang Electric Power Co., Ltd., Harbin 150030, China;

2. Key Laboratory of Engineering Dielectrics and Its Application, Ministry of Education,

Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: When detecting the oil-paper insulation status of transformer based on frequency domain dielectric response (FDS), the nonlinear changes in FDS of oil-paper insulation will affect the accuracy of insulation assessment. Therefore, it is necessary to study the nonlinear changes in the FDS of oil-paper insulation with different ageing degree. The multiple sets of oil-paper insulation models with different ageing degree were prepared in laboratory, and the nonlinear FDS of oil-paper insulation were tested at different temperatures. The results show that the larger the test excitation amplitude, the more significant decrease in the low-frequency range of FDS curve. As the testing temperature and ageing degree increase, the characteristic frequency range of the dielectric loss factor curve showing non-linear changes moves towards the high-frequency direction. On the basis of the modified Davidson-Cole model, the shape parameters in the model were obtained by curve fitting calculation, and then the equivalent circuit model based on the transfer function was established. The nonlinear variation of the impedance modulus of oil-paper insulation was simulated and calculated. According to the simulation results, the circuit parameters of various impedance models are closely related to the nonlinear changes of the dielectric properties of oil-paper insulation, while the change of impedance makes the curve change in the corresponding frequency range.

Key words: oil-paper insulation; ageing; nonlinear dielectric characteristics; extended Davidson-Cole model

0 引言

随着我国电网的快速发展,电力设备的可靠运行至关重要,其中作为关键输配电设备的油浸式电力变压器在长期运行中承受着复杂的电、热、机械

等应力作用,其内部油纸绝缘会逐渐老化^[1-2],因此准确评估主绝缘老化程度成为变压器绝缘诊断的关键。

变压器绝缘老化诊断方法主要分为理化性能分析法和电气测试法。理化性能分析法主要分为直接测试及间接表征。其中,直接测试是根据GB/

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5500-202330167A-1-1-ZN)。

T 29305—2012 相关要求^[1]采用黏度分析的方法计算绝缘纸聚合度,但现场变压器吊罩取样过程复杂,除大修变压器时进行相应检测外,该方法更多的适用于实验室。间接表征主要是通过油色谱分析,根据糠醛、CO₂、CO 等特征产物含量变化^[4-6],间接评估主绝缘老化程度,这也是现场测试的主要方式,但由于变压器油中特征参量值不稳定,而且变压器存在检修换油、滤油等操作,评估结果有较大误差。电气测试法主要包括时域检测方法和频域检测方法。时域检测方法主要有极化去极化电流法(PDC)^[7-9]与回复电压法(RVM)^[10-11];频域检测方法主要有频域介电响应测试(FDS)^[12-14]。现场测试时,由于变电站电磁干扰较大,而频域介电响应测试具有较强的抗干扰能力,因此被广泛用于变压器绝缘状态的无损评估。

已有研究表明,FDS 曲线的特征频段可以定量评估变压器内部油纸绝缘的老化程度,并可以消除测试温度、水分含量对老化评估的影响^[14-15]。传统分析中认为介质损耗因数与测试激励电压的幅值无关,因此在现场测试过程中,为提高检测信号的信噪比,可增大测试激励电压幅值,但在实际测试过程中发现,油纸绝缘材料在不同幅值的激励下,部分频段的介质损耗因数频域曲线不相重合,即介质损耗因数曲线与激励电压幅值有关,该现象被定义为频域介电响应的非线性变化现象。如在实际应用时未考虑现场测试激励电压的不同,简单地将实验室的测试结果通过对比计算的方式应用于现场测试,将严重影响老化评估的准确性。

ZHANG D N 等^[17]基于 Garton 模型理论,对不同含水率油纸绝缘介质损耗因数的非线性变化特性进行了理论分析,由于油浸纸板中纤维分子孔隙的束缚,油纸绝缘内载流子的迁移范围受限,当激励电压幅值超过限值时,载流子在电压反转之前便已达到孔隙的边界,并保持稳定直到电场反转之后,因此出现高幅值激励电压下介质损耗因数降低的现象,但该文对油纸绝缘老化后非线性变化的研究尚不深入;张明泽等^[18]根据不同含水率油纸绝缘内载流子迁移率的变化构建了水分基团迁移率计算模型,定量计算了水分含量对老化油纸绝缘频域介电响应非线性变化的影响,但未量化老化程度对油纸绝缘频域介电响应变化的影响。

目前对于介电弛豫现象的研究多采用 Debye、Cole-Cole、Davidson-Cole、Havriliak-Negami、Dissado-Hill 等模型进行分析^[19-23],用以建立模型参数与介电性能参数的函数关系。杨丽君等^[24]结合跳跃电

导与直流电导模型修正了 Cole-Cole 方程,并提取了油纸绝缘的模型特征参量;DONG M 等^[20]采用 Havriliak-Negami 模型,深入分析了交变电场下油纸绝缘 FDS 曲线与其内部微观电荷运动规律的对应关系,并建立了相应的解谱分析方法;S WOLNY 等^[22-25]建立了 Cole-Cole 模型中形状参数、松弛时间与 RVM 分段拟合曲线参数间的关系。但在上述研究中,对于包含多个松弛过程的等效电路结构模型,其参数变化对频域介电响应曲线的影响研究尚不深入。

为了准确评估变压器油纸绝缘的老化程度,需明确老化后油纸绝缘频域介电响应的非线性变化规律。本文在实验室条件下制备多组不同老化程度的油纸绝缘模型,分别进行不同温度、不同测试激励电压幅值下的频域介电响应测试,并分析老化对油纸绝缘介电参数的影响规律;同时,根据油纸绝缘非线性阻抗模值的变化规律,以修正的 Davidson-Cole 模型为基础,构建基于传递函数的油纸绝缘非线性响应等效电路模型,并通过仿真对比分析,验证该扩展电路模型对评估油纸绝缘频域介电响应非线性变化的有效性。

1 油纸绝缘介电弛豫模型与特征阻抗

1.1 介电弛豫相关模型

最经典的介电弛豫模型是 Debye 模型,但由于 Deybe 模型对实际介质松弛行为的分析有一定的局限性,多个改进模型被提出,如扩展 Debye 模型、Cole-Cole 模型、Davidson-Cole 模型、Havriliak-Negami 模型等。相比于前两种模型,Davidson-Cole 模型和 Havriliak-Negami 模型中的待定参数均能够表征介质松弛时间分散程度,即可表征复介电常数虚部与实部不对称圆弧的偏离程度。但由于 Havriliak-Negami 模型中含有双变量,后续建模中无法建立等效特征阻抗与模型特征阻抗的关系,本文采用 Davidson-Cole 模型进行油纸绝缘非线性分析。未考虑电导影响情况下 Davidson-Cole 模型的复介电常数表达式如式(1)所示。

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + j\omega\tau)^{1-\beta}}, \quad 0 < \beta < 1 \quad (1)$$

式(1)中: ε^* 为复介电常数; ε_∞ 为光频下的介电常数; ε_s 为稳态下的介电常数; ω 为角频率,rad/s; τ 为松弛时间, s ; β 为松弛时间的分散程度。

式(1)为理论推导,未考虑电导,但实际测试中电导的影响不可忽略,因此对 Davidson-Cole 模型进行修正,加电导修正后的 Davidson-Cole 模型复介电

常数表达式如式(2)所示。

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon_\infty + \frac{\varepsilon_s - \varepsilon_\infty}{(1 + j\omega\tau)^{1-\beta}} + \frac{\gamma}{j\varepsilon_0\omega}, \quad 0 < \beta < 1 \quad (2)$$

式(2)中: ε_0 为真空介电常数; γ 为电导率,S/m。

根据式(2)可将复介电常数分解为实部与虚部,表达式如式(3)和式(4)所示^[19]。

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \Delta\varepsilon \cos((1-\beta) \cdot \theta) \cos^{1-\beta} \theta \quad (3)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \Delta\varepsilon \sin((1-\beta) \cdot \theta) \cos^{1-\beta} \theta - \frac{\gamma}{\varepsilon_0\omega} \quad (4)$$

式(3)~(4)中: $\theta = \arctan(\omega\tau)$; $\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty$ 。

因此, 交变电场下的介质损耗因数如式(5)所示。

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} \quad (5)$$

1.2 Davidson-Cole 模型参数提取

介电弛豫模型中存在 τ 、 β 、 $\Delta\varepsilon$ 、 γ 未知参数, 后续理论分析, 需要根据实测的复电容数据, 提取出这些未知参数。本文采用非线性最小二乘法进行油纸绝缘介电弛豫模型的参数提取。

设由介质实测频域复电容数据得到的复介电常数实部为 $\varepsilon'_{\text{real}}$ 、复介电常数虚部为 $\varepsilon''_{\text{real}}$, 代入 MATLAB 程序构建最小二乘目标函数, 如式(6)所示。

$$y(f) = (\varepsilon' - \varepsilon'_{\text{real}})^2 + (\varepsilon'' - \varepsilon''_{\text{real}})^2 = [\varepsilon_\infty + \Delta\varepsilon \cos(\beta\theta) \cos^\beta \theta - \varepsilon'_{\text{real}}]^2 + [\Delta\varepsilon \sin(\beta\theta) \cos^\beta \theta + \frac{\gamma}{\varepsilon_0\omega} - \varepsilon''_{\text{real}}]^2 \quad (6)$$

调用 MATLAB 中 lsqnonlin (非线性最小二乘法) 函数, 为参数 τ 、 β 、 $\Delta\varepsilon$ 、 γ 选择合适的初值, 并求解式(6)中的系数, 使式(6)目标函数 $y(f)$ 的拟合精度最高, 即 $\sum (y(f))^2$ 最小, 即可确定 Davidson-Cole 模型参数。上述参数在后续研究中用于确定油纸绝缘的阻抗分布模型。

1.3 油纸绝缘阻抗分布模型

根据上述 Davidson-Cole 模型, 可计算出介质的导纳表达式, 如式(7)所示。

$$Y(\omega) = \frac{1}{j\omega \left(C_\infty + \frac{C_s - C_\infty}{(1 + j\omega\tau)^{1-\beta}} + \frac{\gamma}{j\varepsilon_0\omega} \right)} \quad (7)$$

式(7)中: C_s 是稳态下介质的电容; C_∞ 是光频下介质的电容; $Y(\omega)$ 表示频域下的介质导纳。

Davidson-Cole 模型有 C_s 、 C_∞ 、 β 、 τ 4 个参数, 通过电介质等效导纳表达式, 可得到电介质极化过程的等效电路, 如图 1 所示。

将式(7)进行拉普拉斯变换可得式(8)~(10)。

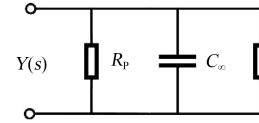


图1 电介质极化等效电路

Fig.1 Dielectric polarization equivalent circuit

$$Y(s) = sC_\infty + \frac{(C_s - C_\infty)s}{(1 + s\tau)^{1-\beta}} = sC_\infty + Y'(s) \quad (8)$$

$$Y'(s) = \frac{1}{Z'(s)} = \frac{(C_s - C_\infty)s}{(1 + s\tau)^{1-\beta}} \quad (9)$$

$$Z'(s) = \frac{1}{s(C_s - C_\infty)(1 + s\tau)^{\beta-1}} \quad (10)$$

式(8)~(10)中: C_s 为稳态下介质的电容; C_∞ 为光频下介质的电容; $Y(s)$ 为进行拉普拉斯变换后的介质导纳; $Z'(s)$ 为特征阻抗; τ 为松弛时间; s 为拉普拉斯变换的变量, 用于分析连续时间系统的性质。

特征阻抗 $Z'(s)$ 可以表征电介质的松弛极化特性, 由式(10)可知, 特征阻抗 $Z'(s)$ 与 s^β 近似成反比, 因此特征阻抗 $Z'(s)$ 伯德图的幅频特性曲线是一条斜率为 $-\beta$ 的曲线。模型中 s 是 $j\omega$ 经过拉普拉斯变换而来, 通常不能取整数, 因此只能通过近似处理确定特征阻抗 $Z'(s)$ 的各阶等效电路参数, 即将特征阻抗 $Z'(s)$ 的幅频特性曲线近似等效为其渐近线, 以此确定其传递函数。

为确定等效特征阻抗 $Z_A(s)$ 曲线的伯德图与传递函数, 首先在测试频段内设定极点和零点个数, 根据极点与零点个数确定极点和零点的位置^[25], 即极点和零点对应的频率位置。特征阻抗 $Z'(s)$ 与其等效阻抗曲线如图 2 所示, 等效阻抗伯德图由惯性环节与一阶微分环节建立, 每个惯性环节对应一个极点、每个一阶微分环节对应一个零点, 因此建立等效阻抗伯德图需要定义极点与零点。在测试频段内, 极点与零点的最小推荐个数 n 的计算公式如式(11)所示^[25]。

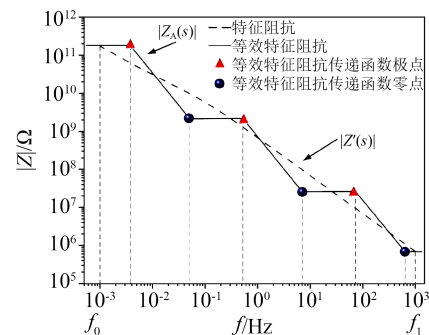


图2 特征阻抗模值和等效特征阻抗模值传递函数伯德图

Fig.2 Bode diagram of characteristic impedance and equivalent characteristic impedance transfer function

$$n = \frac{2}{3} \lg \frac{f_1}{f_0} \quad (11)$$

式(11)中, f_0 、 f_1 分别为起始频率和最终的截止频率。

确定极点与零点个数后, 等效特征阻抗 $Z_A(s)$ 的极点与零点的频率可以由式(12)~(14)计算。

$$f_{p_i} = f_0 \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^{\frac{2i-1-\beta}{2n}} \quad (12)$$

$$f_{z_i} = f_0 \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^{\frac{2i-1+\beta}{2n}} \quad (13)$$

$$Z_A(s) = \left| Z'(f_0) \right| \prod_{i=1}^n \frac{\frac{s}{\omega_{z_i}} - 1}{\frac{s}{\omega_{p_i}} - 1} \quad (14)$$

式(12)~(14)中: ω_{p_i} 是极点的角频率; ω_{z_i} 是零点的角频率; $i=1, 2, 3, \dots, n$ 。

为了通过阻抗特性进一步分析油纸绝缘频域介电响应曲线的非线性变化规律, 将式(10)的特征阻抗 $Z'(s)$ 展开为四阶 RC 阻抗模型, 如图3所示。图3中每一阶 RC 阻抗模型表征一定频段内的介质极化特性, R_p 为修正 Davidson-Cole 模型中的绝缘电阻, 其等效特征阻抗 $Z_A(s)$ 的理论表达式如式(15)所示。

$$Z_A(s) = R_\infty + \sum_{i=1}^n \frac{R_i}{\frac{s}{\omega_{p_i}} - 1} \quad (15)$$

式(15)中: R_∞ 为高频电阻, Ω ; R_i 为各阶阻抗模型的电阻, Ω 。

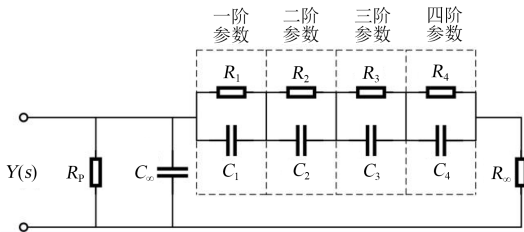


图3 特征阻抗展开的等效电路图

Fig.3 Equivalent circuit diagram of characteristic impedance

通过阻抗的传递函数模型, 可获得等效电路中的各阶参数, 根据式(14)可得式(16)和式(17)。

$$Z_A(s) = \left| Z'(f_0) \right| \prod_{i=1}^n \frac{\omega_{p_i}}{\omega_{z_i}} \cdot \frac{s - \omega_{z_i}}{s - \omega_{p_i}} \quad (16)$$

$$Z_A(s) = \left| Z'(f_0) \right| \prod_{i=1}^n \frac{\omega_{p_i}}{\omega_{z_i}} \cdot \left(1 + \prod_{i=1}^n \frac{s - \omega_{z_i}}{s - \omega_{p_i}} - 1 \right) = \quad (17)$$

$$\left| Z'(f_0) \right| \prod_{i=1}^n \frac{\omega_{p_i}}{\omega_{z_i}} + \prod_{i=1}^n \frac{\omega_{p_i}}{\omega_{z_i}} \left| Z'(f_0) \right| \cdot \left(\prod_{i=1}^n \frac{s - \omega_{z_i}}{s - \omega_{p_i}} - 1 \right)$$

结合式(16)和式(17)可得式(18)和式(19)。

$$R_\infty = \left| Z'(f_0) \right| \prod_{i=1}^n \frac{\omega_{p_i}}{\omega_{z_i}} \quad (18)$$

$$\sum_{i=1}^n \frac{R_i}{\frac{s}{\omega_{p_i}} - 1} = \prod_{i=1}^n \frac{\omega_{p_i}}{\omega_{z_i}} \left| Z'(f_0) \right| \cdot \left(\prod_{i=1}^n \frac{s - \omega_{z_i}}{s - \omega_{p_i}} - 1 \right) = \prod_{i=1}^n \frac{\omega_{p_i}}{\omega_{z_i}} \left| Z'(f_0) \right| \cdot \frac{\prod_{i=1}^n s - \omega_{z_i} - \prod_{i=1}^n s - \omega_{p_i}}{\prod_{i=1}^n s - \omega_{p_i}} \quad (19)$$

利用待定系数法对式(19)进行因式分解, 得到式(20)和式(21)。

$$\frac{\prod_{i=1}^n s - \omega_{z_i} - \prod_{i=1}^n s - \omega_{p_i}}{\prod_{i=1}^n s - \omega_{p_i}} = \frac{A_1}{s - \omega_{p_1}} + \frac{A_2}{s - \omega_{p_2}} + \dots + \frac{A_n}{s - \omega_{p_n}} = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{s - \omega_{p_i}} \quad (20)$$

$$A_i = (s - \omega_{p_i}) \frac{\prod_{i=1}^n s - \omega_{z_i} - \prod_{i=1}^n s - \omega_{p_i}}{\prod_{i=1}^n s - \omega_{p_i}} \Big|_{s=\omega_{p_i}} \quad (21)$$

求出 A_i 即可求得 R_i ($i=1, 2, \dots, n$)。本文以 A_1 为例, 当 $s=\omega_{p_1}$ 时, 可求得式(22)和式(23)。

$$A_1 = \frac{\prod_{i=1}^n s - \omega_{z_i} - \prod_{i=1}^n s - \omega_{p_i}}{\prod_{i=2}^n s - \omega_{p_i}} = \frac{\prod_{i=1}^n \omega_{p_1} - \omega_{z_i} - \prod_{i=1}^n \omega_{p_1} - \omega_{p_i}}{\prod_{i=2}^n \omega_{p_1} - \omega_{p_i}} \quad (22)$$

$$A_1 = \frac{\prod_{i=1}^n \omega_{p_1} - \omega_{z_i}}{\prod_{i=2}^n \omega_{p_1} - \omega_{p_i}} = \frac{\prod_{i=1}^n s - \omega_{z_i}}{\prod_{i=2}^n s - \omega_{p_i}} \quad (23)$$

同理, 通过 $s=\omega_{p_i}$, 得到 A_i , 计算式如式(24)所示。

$$A_i = (s - \omega_{p_i}) \frac{\prod_{i=1}^n s - \omega_{z_i}}{\prod_{i=1}^n s - \omega_{p_i}} \Big|_{s=\omega_{p_i}} \quad (24)$$

由式(19)和式(20)及(24)可得式(25)。

$$R_i = Z_A(s) \left(\frac{s}{\omega_{p_i}} - 1 \right) \Big|_{s=\omega_{p_i}} \quad (25)$$

根据惯性环节及一阶微分环节相频特性可知, 当 $\omega T=1$, 即 $\omega=1/T$ 时, $\angle G(j\omega)=45^\circ$, $G(j\omega)$ 表示系统的频率响应函数, ω 是频率。 $\angle G(j\omega)=45^\circ$ 表示系统在该频率下的相位角(相对于输入信号的相位角)为 45° , 此时容抗等于阻抗, 因此电容 C_i 可表示为式(26)。

$$C_i = \frac{1}{\omega_p R_i} \quad (26)$$

由上述计算式可求出 R_i 、 C_i 的值, 然后再通过式(15)计算图3等效电路模型的阻抗。

2 实验方法与测试系统

本文选用魏德曼公司生产的未漂硫酸盐木浆绝缘纸板及中石油生产的45#矿物变压器油作为实验材料, 实验流程如图4所示, 具体实验步骤如下:

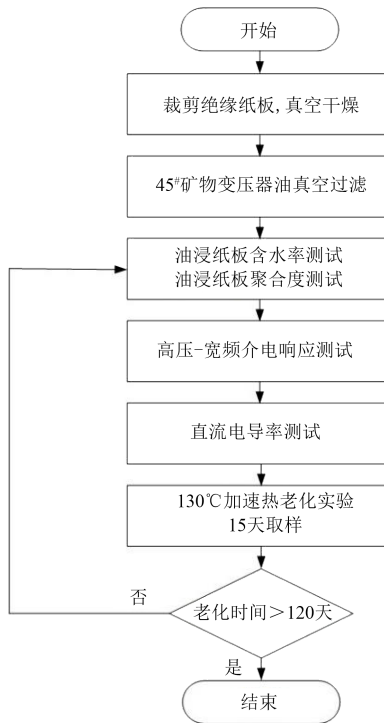


图4 实验流程图

Fig.4 Experimental flow chart

(1)将绝缘纸板裁剪成厚度为1 mm、尺寸为160 mm×160 mm的方块, 并将其放入90℃的干燥箱中连续真空干燥48 h。

(2)将新的45#矿物变压器油通过真空滤油机进行处理, 使得变压器油中的水分含量降至 7×10^{-6} 。

(3)将上述干燥后的绝缘纸板放入变压器油中真空浸渍24 h(期间进行多次充放气), 消除油浸纸板中的空气。

(4)通过卡尔费休水分测定仪对油浸纸板中的水分含量进行测试, 通过黏均聚合度法对油浸纸板的聚合度(DP)进行测试。

(5)将制备好的油浸纸板试样放置于恒温烘箱中, 通过搭建的高压-宽频介电响应测试系统进行频谱测试, 测试电极为三电极, 测试温度分别为30、60、90℃, 测试频率为 $10^{-3} \sim 10^3$ Hz, 测试电压分别为100、500、1 000、2 000 V。

(6)同理, 对油浸纸板试样进行直流电导率测试, 测试温度分别为30、60、90℃, 测试电压分别为100、500、1 000、2 000 V。

(7)将油浸纸板试样在130℃条件下进行加速热老化实验, 间隔15天取样重复步骤(4)~(6)并记录结果, 最终油浸纸板试样的老化时间为120天。

不同老化阶段油浸纸板的表面形貌如图5所示, 变压器油的颜色变化如图6所示。其中, 第1阶段为未老化试样, DP=1 005; 第2阶段为老化15天试样, DP=617; 第3阶段为老化60天试样, DP=405; 第4阶段为老化120天试样, DP=285。从图5可以看出, 随着老化程度的增加, 油浸纸板的颜色逐步由淡黄色转变为黑褐色, 且在老化后期油浸纸板表面出现了分层、破损现象, 表明纸板中纤维素出现断裂现象。从图6可以看出, 变压器油在未老化时为透明淡黄色, 老化后期变压器油中出现大量油泥, 变压器油的颜色转变为黑色。



图5 不同老化阶段的油浸纸板表面形貌变化

Fig.5 Changes of surface morphology of oil-immersed pressboard at different ageing stages

FDS 试验平台如图7所示, 为避免试样表面电流对测试产生影响, 测试采用三电极系统, FDS测试选用美国Megger公司的IDAX-300型绝缘诊断分析仪, 并配备VAX 020型放大器, 可提供0~2 kV(峰值)的测试电压, 测试频段为1 mHz~1 kHz; 直流电导率测试选用Keithley-2290-10型直流高压源, 可提供0~10 kV稳定电压; 选用Keithley-6517B型静电计对油纸绝缘试样进行微电流检测, 电流测量范围为1 fA~20 mA。

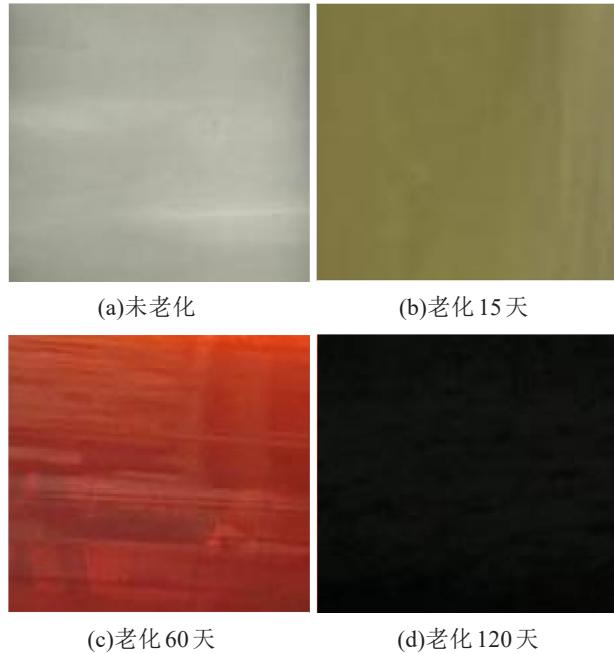


图6 不同老化阶段的变压器油颜色变化
Fig.6 Color change of transformer oil at different ageing stages

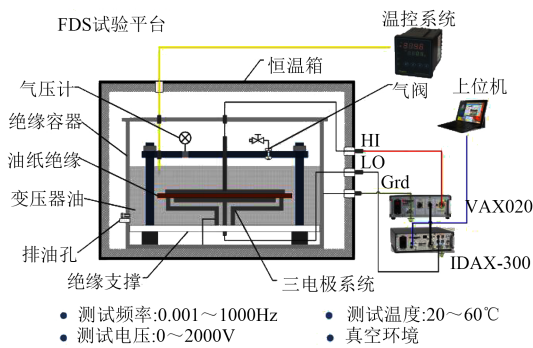


图7 FDS 试验平台
Fig.7 FDS test platform

3 结果分析与仿真研究

3.1 油纸绝缘FDS曲线非线性分析

对不同老化阶段的油纸绝缘进行FDS测试,同时对其进行理化性能测试,得到不同老化阶段试样的聚合度及含水率如图8所示。从图8可以看出,随着老化时间的增加,聚合度逐渐降低,在老化初期下降趋势明显,当聚合度降至600后,下降趋势明显变缓,而老化后的油纸绝缘含水率均在0.8%左右,并无明显变化。

在100~2000V激励电压下对不同老化阶段厚度为1mm的油纸绝缘试样进行直流电导率测试,测试场强为0~2kV/mm,结果如图9所示。从图9可以看出,随着测试温度的升高,相同老化程度油纸绝缘的直流电导率显著增大,与文献[28]中电导率随温度指数变化特性一致,直流电导率与测试

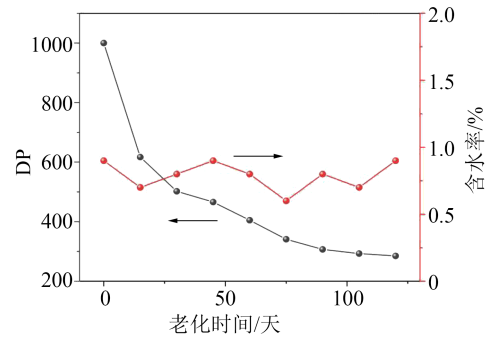


图8 不同老化阶段油纸绝缘的聚合度和含水率变化
Fig.8 The change of polymerization degree and moisture content of oil-paper insulation at different ageing stages

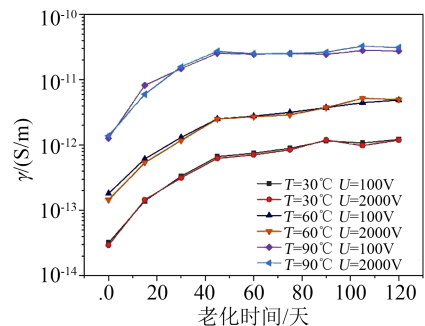


图9 不同老化阶段油纸绝缘的电导率变化

Fig.9 The change of electrical conductivity of oil-paper insulation at different ageing stages

温度呈正相关关系。从图9还可以看出,在测试场强范围内,油纸绝缘的直流电导率几乎不随激励电压幅值而变化。

不同测试激励电压幅值对变压器油纸绝缘的阻抗存在一定影响,在测试电压分别为100、500、1000、2000V,测试温度为30°C时,油纸绝缘FDS测试的复电容实部、虚部曲线如图10所示。从图10可以看出,在不同激励电压幅值作用下,复电容实部、复电容虚部曲线在中低频段呈现负相关非线性现象,即测试激励电压幅值越大,低频段复电容实部、复电容虚部值越小。

基于Garton离子运动理论^[28]可知,随着测试激励电压幅值增大,离子在电场力的作用下,一个周期内离子运动距离大于孔隙大小,导致离子运动受到孔隙边界限制,到达孔隙边界时停止运动,使得介质损耗减小。由于复电容虚部可以表征介质极化损耗的大小,因此复电容虚部在低频段产生非线性现象。而复电容实部表征电容率,在低频段电容率主要受空间电荷影响,当测试激励电压幅值较低时,电荷大部分在油纸绝缘的孔隙中往复运动,随着测试激励电压幅值增大,电荷受到孔隙边界的限制,孔隙两端积累电荷增多,且在高压侧累积负电荷,低压侧累积正电荷,使得外施电场作用降低,最终影响油纸绝缘极化能力,导致复电容实部减小^[18]。

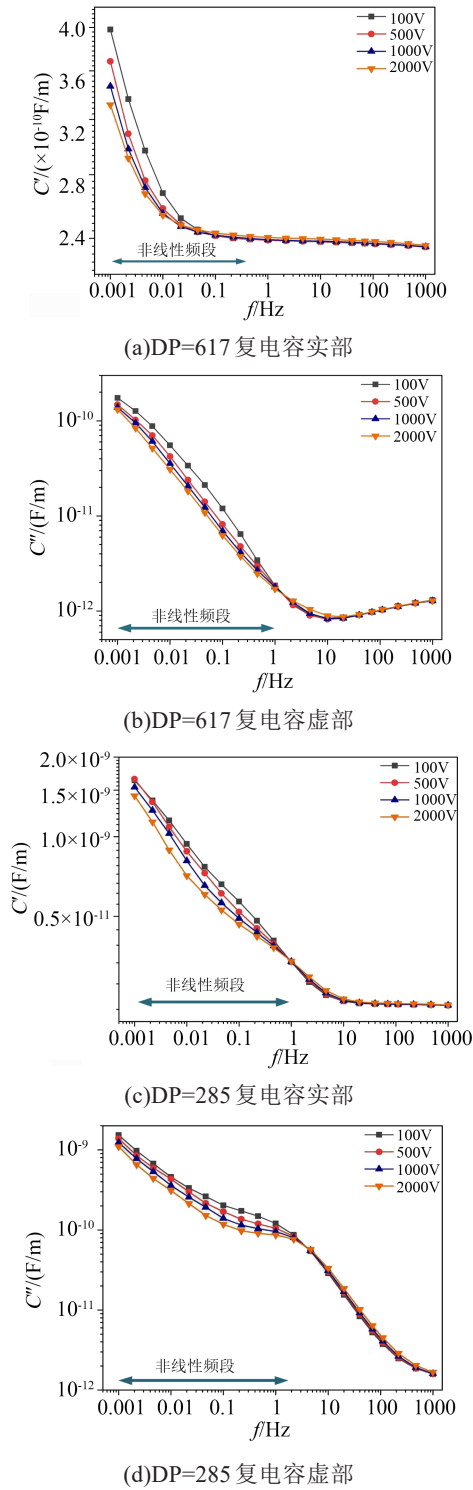


图10 30°C下油纸绝缘的复电容实部和复电容虚部曲线

Fig.10 The real and imaginary part curves of complex capacitance of oil-paper insulation at 30°C

此外，油纸绝缘老化越严重，复电容实部、复电容虚部曲线的非线性变化现象越明显。其主要原因是当油纸绝缘老化后，纸板内纤维素断裂，离子数量增多，孔隙对离子运动的限制加强，最终导致复电容虚部的非线性现象更加明显；同时随着油纸绝缘老化，孔隙也随之变大，因此复电容实部的非

线性现象随着油纸绝缘老化而更加明显。

当测试温度为90°C时，不同激励电压幅值下油纸绝缘的FDS测试结果如图11所示。对比图10、图11可以看出，随着测试温度的升高，油纸绝缘复电容实部、复电容虚部的值均明显增大。根据文献[18]可知，当测试温度升高后，油纸绝缘体系内分子

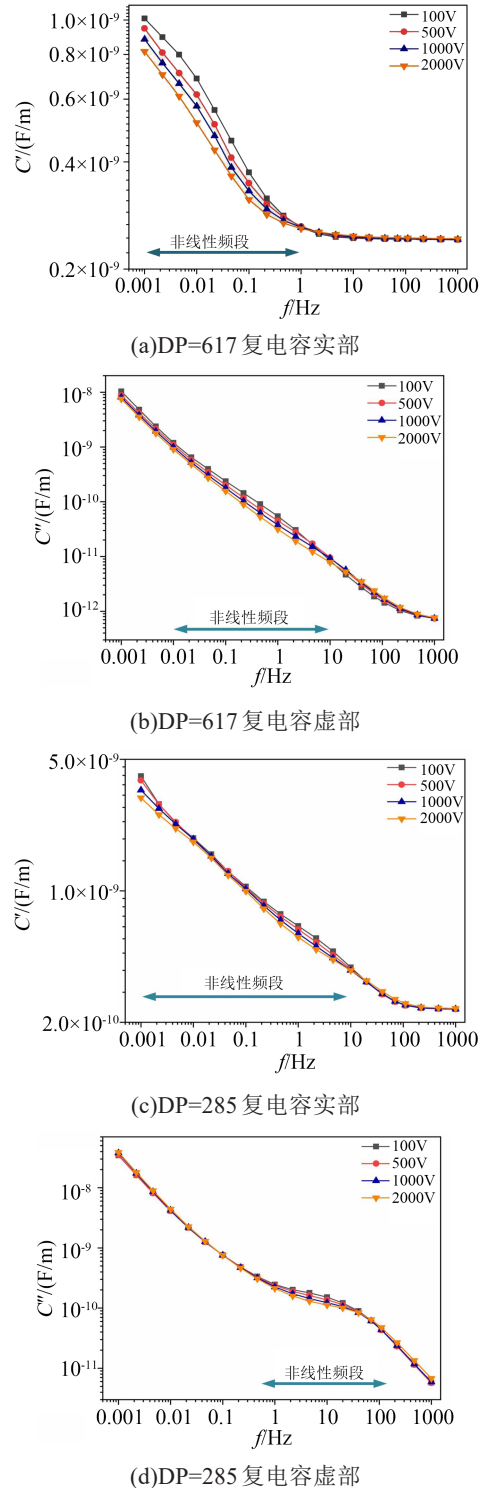


图11 90°C下油纸绝缘的复电容实部和复电容虚部曲线

Fig.11 The real and imaginary part curves of complex capacitance of oil-paper insulation at 90°C

热运动现象明显,分子运动速率增加,在低频不同激励电压幅值的作用下,孔隙内的离子均可运动至孔隙边缘,离子振荡过程受限,宏观上表现为介质损耗因数曲线的非线性现象消失,即相比于图10,图11中复电容虚部曲线在低频段基本重合^[18]。在中高频不同激励电压幅值的作用下,离子运动速率加快,仅在激励电压幅值较大时,离子可运动至孔隙边缘,而在较低激励电压幅值作用时,离子在孔隙内可完成周期性振荡,因此复电容虚部曲线在中高频段出现非线性变化,说明测试温度的升高使得油纸绝缘频域介电响应非线性变化区间向中高频移动。

3.2 模型参数提取

根据1.2节内容,提取100 V和2 000 V测试电压下,不同温度、不同老化阶段下介电弛豫模型中的未知参数,结果如表1所示。

表1 修正 Davidson-Cole 模型形状参数

Tab.1 Modified Davidson-Cole model shape parameters

温度 /°C	DP	电压 /V	τ	$\Delta\epsilon$	β	γ /($\times 10^{-13}$ S/m)	R^2	
30	617	100	129.9	3.0	0.65	1.2	0.988	
		2 000	123.7	1.6	0.70	1.1	0.995	
	405	100	154.9	8.7	0.58	3.4	0.980	
		2 000	150.8	5.6	0.63	3.2	0.988	
	285	100	204.7	21.6	0.34	11.9	0.987	
		2 000	194.3	17.9	0.40	12.3	0.994	
	60	617	100	83.7	8.9	0.62	6.1	0.988
			2 000	79.4	5.7	0.66	5.2	0.987
405		100	101.0	8.7	0.58	13.3	0.986	
		2 000	90.6	5.6	0.63	12.1	0.988	
285		100	306.6	21.6	0.34	48.7	0.992	
		2 000	289.5	17.9	0.40	49.7	0.985	
90		617	100	136.0	10.8	0.45	80.6	0.991
			2 000	128.9	8.6	0.56	77.0	0.989
	405	100	152.1	16.0	0.37	148.8	0.987	
		2 000	142.3	13.9	0.44	156.9	0.977	
	285	100	527.1	92.3	0.32	271.7	0.990	
		2 000	506.2	80.4	0.50	288.0	0.989	

由表1可知,老化程度相同的油纸绝缘试样,在相同测试温度下,随着测试激励电压幅值增大,松弛时间 τ 与测试激励电压幅值呈负相关,其主要与激励电压幅值对油纸绝缘内离子振荡过程的影响有关^[17];参数 $\Delta\epsilon$ 表征稳态介电常数与光频介电常数的差值,其变化规律与复电容实部变化有关;模型参数 β 表征松弛时间分散程度,当测试激励电压幅值增大时,模型参数 β 增大,松弛时间分散程度减

小;电导率参数 γ 与测试激励电压幅值基本无关,与图9中直流电导率的实测结果变化规律一致。

油纸绝缘老化程度及测试温度对模型中各参数也存在影响。在相同测试温度下,随着油纸绝缘老化程度的增加,由于极性分子数的增多,松弛时间 τ 逐渐增大,而在DP=617和DP=405时,松弛时间 τ 在不同测试温度下出现先减小后增大的变化趋势,其主要原因为测试温度较低时,介质的松弛时间较大,随着测试温度升高,分子热运动速率增加,松弛时间减小,但温度更高时,分子热运动加剧阻碍了极性分子的定向运动,使得松弛时间增加。而对于老化严重的油纸绝缘试样(DP=285),由于其内部孔隙较大,极化分子数更多,温度对其松弛时间的影响更为显著,因此随着测试温度的升高,松弛时间均增大。此外,随着油纸绝缘老化程度的增加或测试温度的升高,模型参数 $\Delta\epsilon$ 及电导率 γ 均逐渐增大,而模型参数 β 与油纸绝缘老化程度及测试温度均呈现负相关的变化规律,即温度升高或老化严重均使得松弛时间分布更分散。

3.3 油纸绝缘FDS曲线非线性仿真分析

由3.1可知,电场强度在0~2 kV/mm范围内变化时,外加测试激励电压幅值的变化对直流电导率几乎无影响,而复介电常数会随着测试激励电压幅值改变而发生变化。根据上述现象可知,油纸绝缘内部极化过程将引起FDS测试曲线的非线性现象,即与表征介质极化特性的特征阻抗 $Z'(s)$ 有关。

根据3.2节中获得的修正 Davidson-Cole 模型参数,结合1.3节中的理论分析,可得到基于传递函数的油纸绝缘非线性响应等效电路模型,通过对模型仿真计算,可以获得不同激励幅值下油纸绝缘非线性变化规律。首先,本文根据式(4),消除了电导率 γ 对介质极化特性的影响,并结合实测油纸绝缘复电容数据,获得了表征介质极化特性的特征阻抗模值实测曲线;同时依据3.2节提取的模型形状参数,计算得到 Davidson-Cole 模型扩展电路中的各阶电路阻抗参数,仿真计算得到介质极化特性的特征阻抗模值曲线。

为了研究介质极化特性特征阻抗模值的非线性变化,首先分析各阶电路阻抗参数对介质极化特性特征阻抗模值的影响。根据式(12)和式(23)可知,图3中各阶阻抗值与频率有关,直接影响油纸绝缘特征阻抗模值曲线。因此,本文以聚合度为617的油浸纸板,测试温度为30°C,测试激励电压幅值为100 V的特征阻抗模值曲线为例,提取参数后分别改变10倍的 R_1 、 R_3 、 R_∞ 阶电阻值,分析各阶阻抗变

化后对特征阻抗模值曲线的影响,仿真计算结果如图12所示。

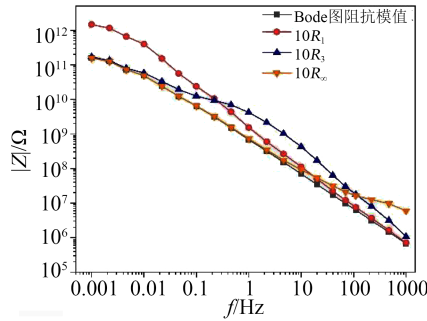
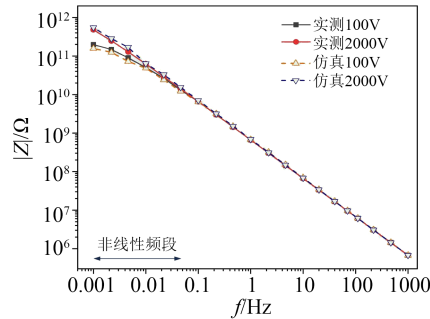


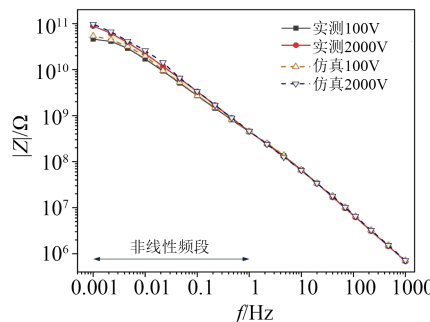
图12 不同阻抗参数下油纸绝缘极化特性阻抗模值曲线
Fig.12 Polarization characteristic impedance modulus curves of oil-paper insulation at different impedance parameters

由式(22)和式(23)可知,当 $s=\omega_{p_i}$ 时, R_1 、 R_3 、 R_∞ 分别表征频率为 ω_{p_1} 、 ω_{p_3} 、 ω_{max} 时的电阻值,因此电路模型中各阶阻抗参数可表征对应频段油纸绝缘的极化特性。

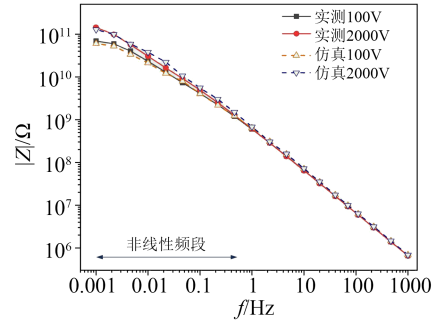
不同老化程度油纸绝缘特征阻抗模值的实测与仿真结果对比曲线如图13所示。从图13可以看出,随着测试激励电压幅值的增大,特征阻抗曲线出现非线性变化;当绝缘纸板老化后,油纸绝缘特征阻抗模值曲线呈现的非线性变化规律更加明显,且出现非线性的特征频段向高频移动。当测试温度升高后,相同老化程度下油纸绝缘模型的特征阻抗模值减小,油纸绝缘特征阻抗模值非线性变化的



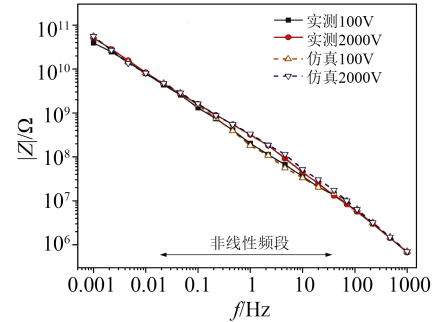
(a) $T=30^\circ\text{C}$, DP=617



(b) $T=30^\circ\text{C}$, DP=285



(c) $T=90^\circ\text{C}$, DP=617



(d) $T=90^\circ\text{C}$, DP=285

图13 油纸绝缘极化特性阻抗模值曲线

Fig.13 Polarization characteristic impedance modulus curves of oil-paper insulation

特征频段向高频移动,各仿真计算曲线与实测曲线基本一致,拟合优度如表2所示。

表2 仿真结果平均相对误差

Tab.2 Average relative error of simulation results

温度/ $^\circ\text{C}$	聚合度	测试激励电压幅值/V	R^2
30	617	100	0.987
		2000	0.971
	285	100	0.987
		2000	0.989
60	617	100	0.986
		2000	0.987
	285	100	0.981
		2000	0.987
90	617	100	0.998
		2000	0.989
	285	100	0.987
		2000	0.974

4 结论

本文对老化后油纸绝缘频域介电响应非线性的变化规律进行了分析,构建了基于传递函数的Davidson-Cole电路模型,得到如下结论:

(1)随着测试激励电压幅值增大,油纸绝缘电容曲线低频段出现下降趋势,且测试温度越高,

油纸绝缘非线性变化越明显。

(2)油纸绝缘老化后,其阻抗模值非线性变化显著,且随着老化程度的增加,油纸绝缘出现非线性变化频段向高频方向移动。

(3)基于传递函数的Davidson-Cole电路模型,其各阶阻抗参数可有效表征对应频率区间的油纸绝缘非线性变化规律,仿真结果计算准确度较高。

参考文献:

- [1] MANDLIK M, RAMU T S. Moisture aided degradation of oil impregnated paper insulation in power transformers[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(1): 186-193.
- [2] 宋友,阮江军,王珊珊,等.油浸式变压器绝缘油热特性的仿真分析[J].绝缘材料,2015,48(4):21-24,29.
- [3] 全国电气绝缘材料与绝缘系统评定标准化技术委员会.新的和老化后的纤维素电气绝缘材料粘均聚合度的测量:GB/T 29305—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [4] WANG D Y, ZHOU L J, WANG A, et al. Effects of thermal aging on moisture diffusion in insulation paper immersed with mineral oil[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2018,25(5):1888-1896.
- [5] 吴广宁,崔运光,段宗超,等.有机酸对变压器油纸绝缘进一步热老化的催化作用试验研究[J].高电压技术,2015,41(3):832-839.
- [6] CHEIMI L, PLATTS D, PREVOST T, et al. Furan analysis for liquid power transformers[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2012,28(2):8-21.
- [7] 陈俊鸿,刘庆珍,高浩.基于矩阵束算法的油纸绝缘变压器去极化电流等效电路参数辨识[J].广东电力,2021,34(1):89-96.
- [8] 赵荣普,陈井锐,赵威,等.基于极化-去极化电流法变压器油纸绝缘老化状态评估[J].绝缘材料,2017,50(12):78-82.
- [9] DUTTA S, MISHRA D, HAQUE N, et al. Influence of temperature on interfacial charge of power transformer insulation[J]. IET Science, Measurement & Technology,2019,13(7):1059-1067.
- [10] 蔡金锭,林晓宁.基于时域介电谱平均弛豫因子的变压器油纸绝缘诊断[J].电机与控制学报,2019,23(12):108-115.
- [11] ZHANG T, TAN X R, ZHANG B, et al. Study on moisture and aging of oil-paper insulation using relative initial slope of recovery voltage[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity,2016,26(7):0609404.
- [12] LIAO R J, LIU J F, YANG L J, 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.
- [13] 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.
- [14] LIU J F, FAN X H, ZHANG Y Y, et al. Quantitative evaluation for moisture content of cellulose insulation material in paper/oil system based on frequency dielectric modulus technique[J]. Cellulose,2020,27(3):2343-2356.
- [15] 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):2020-2030.
- [16] ZHANG M, LIU J, QI P, et al. Improved method for measuring moisture content of mineral-oil-impregnated cellulose press-board based on dielectric response[J]. Cellulose, 2018, 25(10): 5611-5622.
- [17] ZHANG D N, YUN H, ZHAN J Y, et al. Insulation condition diagnosis of oil-immersed paper insulation based on non-linear frequency-domain dielectric response[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2018,25(5):1980-1988.
- [18] 张明泽,孟繁昊,刘骥,等.变压器油纸绝缘频域介电响应非线性特性研究[J].中国电机工程学报,2022,43(2):831-842.
- [19] 董明,刘媛,任明,等.油纸绝缘频域介电谱特征参数提取及绝缘状态相关性研究[J].中国电机工程学报,2015,35(23):6246-6253.
- [20] DONG M, REN M, WEN F X, et al. Explanation and analysis of oil-paper insulation based on frequency-domain dielectric spectroscopy[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(5):2684-2693.
- [21] GAO J, YANG L J, WANG Y Y, et al. Condition diagnosis of transformer oil-paper insulation using dielectric response fingerprint characteristics[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(2):1207-1218.
- [22] 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.
- [23] 梁曦东,高岩峰,DISSADO L A. Dissado-Hill模型在电介质介电响应分析中的应用[J].中国电机工程学报,2016,36(21):6002-6011.
- [24] 杨丽君,齐超亮,邓帮飞,等.采用修正Cole-Cole模型提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.
- [25] WOLNY S. Aging degree evaluation for paper-oil insulation using the recovery voltage method[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2015,22(5):2455-2462.
- [26] International Electrotechnical Commission. Insulating liquids-oil-impregnated paper and pressboard-determination of water by automatic coulometric karl fischer titration: IEC 60814-1997[S]. Geneva,Switzerland:IEC,1997.
- [27] WANG D Y, ZHOU L J, WANG L J, et al. Frequency domain dielectric response of oil gap in time-varying temperature conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(2):964-973.
- [28] GARTON C. Dielectric loss in thin films of insulating liquids [J]. Journal of the Institution of Electrical Engineers-Part II: Power Engineering,1941,88(2):103-120.

收稿日期:2023-04-27;修回日期:2023-07-26。

作者简介:曲利民(1990-),男(汉族),黑龙江哈尔滨人,工程师,主要从事电力变压器(电抗器)故障诊断及相关研究的工作;张健(1981-),男(汉族),黑龙江哈尔滨人,教授级高级工程师,主要从事电力设备状态监测及故障诊断的研究工作。