

基于分数 Zener 模型的植物油纸绝缘状态评估

张 涛¹, 张 陈¹, 王 铎², 任乔林³, 肖 洒³

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002;
2. 湖北省输电线路工程技术研究中心, 三峡大学, 湖北 宜昌 443002;
3. 国网湖北省电力有限公司孝感供电公司, 湖北 孝感 432100)

摘要: 介电响应理论的频域介电谱法可以有效地判断变压器的绝缘状况, 因此为了量化研究植物油纸绝缘老化与频域介电谱的关系, 本文引入分数元和分数微积分概念, 提出了采用分数 Zener 模型提取植物油纸绝缘频域介电谱特征量的辨识方法。该方法能直接反映出油纸绝缘频域介电谱携带的信息, 利用实验获取的复介电常数值求取分数 Zener 模型参数, 即采用最小二乘法建立优化目标函数, 并运用遗传算法求解模型参数, 同时利用粒子群算法对其进行验证, 得到特征量: 形状参数 β 、参数 ε_0 、松弛时间 τ , 最后对计算结果重构。研究结果表明仿真结果与测量数据具有一致性, 且低频段拟合度更高, 建立的模型是可行的; 得到的形状参数 β 、松弛时间 τ 与油中酸值呈指数函数关系, 参数 ε_0 与油中酸值呈线性关系, 因此, 为评估植物油纸绝缘系统绝缘状态提供了一种新思路。

关键词: 植物油纸绝缘; 分数微积分; 分数 Zener 模型; 频域介电谱; 复介电常数

DOI: 10.12067/ATEEE1907047 **文章编号:** 1003-3076(2020)07-0037-08 **中图分类号:** TM855

1 引言

油浸纸绝缘系统作为变压器内部重要的结构, 起到绝缘和支撑的作用, 其电气性能的优劣直接影响着变压器安全运行的可靠性^[1,2]。目前电力系统中使用的矿物绝缘油难以生物降解, 一旦泄漏, 就会污染水源和生活环境, 促使人们寻找一种可以代替矿物绝缘油的新型液体绝缘材料。植物绝缘油具有燃点高、可降解等优点, 可作为矿物绝缘油的替代品^[3,4]。植物油是由甘油和脂肪酸链组成的酯混合物。甘油三酯含有不饱和脂肪(如油酸, 亚油酸和 α 亚麻酸)和饱和脂肪(如肉豆蔻酸, 棕榈酸和硬脂酸)^[5], 两者成分的不同决定了它们在化学以及物理性能等多个方面的差别。为了更快地将植物变压器油广泛投入到实际应用中, 其油纸绝缘系统老化特性的深入探究是一项必不可少的基础课题, 也是决定植物变压器油成功应用的关键之一。

国内外研究者开展了大量植物油纸系统加速老

化试验, 探究不同温度、水分下, 击穿电压、体积电阻率、损耗因素等电气量的变化规律以及油中酸值、糠醛含量等与老化程度的关系, 但此类检测方法需要对变压器进行有损取样, 且易受到温度和湿度等外在因素的干扰^[6-8]。目前, 基于介电响应特性无损诊断技术的频域介电谱(Frequency Domain Spectroscopy, FDS)被广泛使用, 它能通过植物油纸绝缘频率特征量的变化来有效评估绝缘系统的老化状态^[9,10]。该方法在矿物油纸绝缘系统的研究中取得一些成果, 但建立的响应模型在植物绝缘油纸系统评估的解释还存在缺陷。最近, 文献[11]研究了在所选择的频率范围内产生的介电常数和介电损耗, 并且已经观察到甘油三酯显示出德拜型行为。文献[5]为了评估植物油的介电参数, 使用 Havriliak-Negami 方程来计算频率相关的复介电常数 $\varepsilon^*(\omega)$ 数据。文献[12]描述了不同温度下甘油三酯的 Cole-Cole 图, 研究表明所测试材料中介电常数与介电损耗的变化证明了甘油三酯的松弛过程可以用介电模

型来解释。

针对油纸绝缘这种复合电介质,基于分子极化特性及介电松弛理论的经典 Debye 模型只考虑了单一松弛时间,在描述松弛过程时具有局限性^[13]。后来学者们提出的 Cole-Cole 模型绘制的曲线与实测曲线偏差较大^[14]; Havriliak-Negami 模型虽然整体拟合度高,但远离峰值的曲线拟合精度偏低^[15]。上述模型在一定程度上能对介电特性进行描述,但进一步寻求能有效表征植物油纸绝缘的介电特性的介电模型十分重要。分数微积分概念的提出最早起源于 Leibniz 和 Newton 创立微分数学,其后被运用到介电松弛特性的描述,Reyes-Melo 等学者提出“分数元”的概念,将电阻和电容整合成一个电气元件^[16]。经过分数元的串并联,组合成了分数 Maxwell 模型以及优化后的分数 Zener 模型,这些模型满足热力学稳定性^[17]。文献[18]从微观机理对介电特性进行了综合分析,得出了电介质服从分数指数幂定理的结论。文献[19]由微观角度论证了分数特性适用于电介质的松弛极化过程的描述。因此,本文考虑使用分数模型来描述植物油纸系统的松弛过程。但在描述介电松弛时,发现分数 Maxwell 低频段拟合结果并不理想^[20]。而将分数 Maxwell 模型并联一个分数元,得到分数 Zener 模型,可以更为精确地阐述油浸式变压器中油纸绝缘系统介电常数的频变特性。

为此,本文制备了不同老化程度植物油浸纸样本,将试验得到的频域介电谱特征量复介电常数数据代入模型辨识出分数 Zener 模型参数,并运用遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 优化模型特征量,随后使用粒子群 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法证实分数 Zener 模型的可靠性。最后分析老化程度对分数 Zener 模型参数的影响,并将分数 Zener 模型的形状参数 β 、松弛时间 τ 、参数 ε_0 作为评估植物油纸绝缘老化状态的参考特征参量。

2 油纸绝缘的分数介电模型理论

2.1 油纸复合电介质

油纸绝缘是典型的电介质,在外加电压作用下,绝缘介质会发生极化,极化后在绝缘介质表面出现极化电荷,图 1 为 Debye 模型等效电路。撤去外加电压后,绝缘介质松弛,极化电荷缓慢释放^[15],该过程与 Debye 松弛的观点一致,这对分析植物油纸绝缘介电响应十分重要。经典 Debye 是与角频率 ω 相关的方程:

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

式中, $\varepsilon^*(\omega)$ 为复介电常数; $\varepsilon'(\omega)$ 为实部; $\varepsilon''(\omega)$ 为虚部; ε_s 和 ε_∞ 分别为稳态、光频介电常数; τ 为松弛时间。

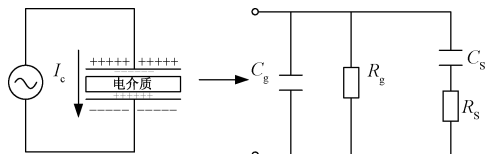


图1 Debye 模型等效电路

Fig.1 Equivalent circuits of Debye model

显然,式(1)是基于一个理想偶极子的物理系统,然而实际中油纸绝缘系统内部运动形式是复杂的。为了明确介电存储、介电损耗与频率之间的关系,引入 α 定义了经验 Cole-Cole 模型^[21]:

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

Cole-Cole 模型中的理想电阻与分数微积分概念相似,结合油纸绝缘系统低频区载流子占主导地位产生强烈的弥散现象,可见,油纸绝缘介电响应的普适关系可以用幂函数来表述,其指数为 0~1 之间的分数。

2.2 分数微积分

十九世纪中期,分数微积分有了不同的定义,大量的研究表明, Riemann-Liouville (R-L) 是最受认可也是目前为止应用最为广泛的一种定义^[22]。其分数积分如式(3)所示:

$$S_0(t) = \int_0^t v(\tau) dg_t(\tau) = {}_0I_t^\alpha v(t) \quad (3)$$

$$g_t(\tau) = \frac{1}{\Gamma(\alpha + 1)} [t^\alpha - (t - \tau)^\alpha] \quad (4)$$

式中, I 为积分算子; $g_t(\tau)$ 描述不均匀的时间尺度,给出时间 τ 与 $g_t(\tau)$ 的关系式, $0 \leq \tau \leq t$ 。从式(3)做 $S_0(t)$ 的 R-L 分数导数,如下:

$$v(t) = {}_0D_t^\alpha S_0(t) \quad (5)$$

式中, ${}_0D_t^\alpha$ 表示 R-L 分数阶导数,当 $0 < \alpha < 1$ 时,定义为:

$${}_0D_t^\alpha f(t) = \frac{1}{\Gamma(1 - \alpha)} \frac{d}{dt} \int_0^t \frac{f(\tau) d\tau}{(t - \tau)^\alpha} \quad (6)$$

式(6)表示移动物体经过的实际距离 $S_0(t)$ 的 R-L 分数导数。对宇宙时间变量 t 的关系进行微分,从独立观测者 O 和个体速度 $v(t)$ 的角度给出运动的速度 $v_0(t) = S'_0(t)$ 之间的关系:

$$v_0(t) = \frac{d}{dt} I_t^\alpha v(t) = {}_0D_t^{1-\alpha} v(t) \quad (7)$$

因此,单个速度 $v(t)$ 的 $(1-\alpha)$ 阶 R-L 导数等于 $v_0(t)$ 的速度。对于 $\alpha = 1$, 时间尺度没有动态变化时,两个速度重合且相等。

2.3 分数元

分数元被称为容阻器,其电学性质被定义为介于电容和电阻之间。理想状态的电容器满足式(8),一个电阻器件满足式(9)。

$$V_C(t) = \frac{Q_C(t)}{C} \quad (8)$$

$$V_R(t) = RI(t) = \frac{dQ_R(t)}{dt} \quad (9)$$

分数元的特性符合式(10):

$$V_{RC}(t) = \frac{\tau^\beta}{C} \frac{d^\beta Q_{RC}(t)}{dt^\beta} \quad (10)$$

式中, $V_C(t)$ 、 $V_R(t)$ 、 $V_{RC}(t)$ 分别为施加在电容器、电阻以及分数元两端的电压; Q_C 、 Q_R 、 Q_{RC} 为电量; τ 为松弛时间常数; $d^\beta Q_{RC}(t)/dt^\beta$ 为电量对时间的分数导数,且 $0 \leq \beta \leq 1$ 。

对分数导数式(10)作 Fourier 变换得到:

$$V_{RC}^*(\omega) = \frac{(j\omega\tau)^\beta}{C} Q_{RC}^*(\omega) \quad (11)$$

由此可以得到容阻器的复介电常数为:

$$\varepsilon^*(\omega) = \frac{C^*(\omega)}{C_0} = \frac{\varepsilon}{(j\omega\tau)^\beta} \quad (12)$$

式中, ω 为角频率; C_0 为真空平行电容器的电容,其大小只与电容器的几何尺寸有关; ε 为反映复介电常数绝对大小的参量。

2.4 分数 Zener 模型

由文献[20]可知,单个的分数元不适合描述典型的介电松弛过程。若将分数元简单串并联构成模型,这时得到的特征方程可以阐述一般介质的介电松弛过程。分数 Maxwell 模型由两个分数元 (α, C_1, τ_1) 和 (β, C_2, τ_2) 串联而成,如图 2(a) 所示,该模型在表征植物油纸绝缘的介电松弛响应时显现出不适用性^[23]。正是由于分数 Maxwell 模型表现出的松弛响应等效为具有损耗峰的“偶极子主导介电松弛”过程,所以此类松弛过程中当频率降低时介电常数会逐渐趋向于稳定值,但在植物油纸的低频响应中表现出显著的低频弥散现象,松弛导致的介电常数实部和虚部同时随着频率的降低幂指数上升。因此必须在 Maxwell 模型上并联一个分数元 (γ, C_3, τ_3) ,

这个容阻器的频域响应特性满足低频弥散的表达式,由此组成了分数 Zener 模型,如图 2(b) 所示,它能更好地达到辨识效果。

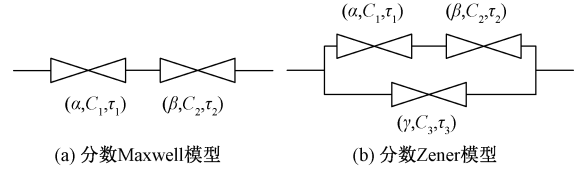


图 2 分数阶模型

Fig.2 Fractional-order models

串联电路中,流过各个元件的电流相等,总电压是各个元件两端电压的总和。根据电流相等原则,可知分数 Maxwell 模型的本构方程为:

$$V(t) = \frac{\tau^\alpha}{C} \frac{d^\alpha Q(t)}{dt^\alpha} + \frac{\tau^\beta}{C} \frac{d^\beta Q(t)}{dt^\beta} \quad (13)$$

由图 2(b) 可以看出,分数 Zener 模型由分数 Maxwell 模型并联一个分数元组成,其中两条支路两端电压相等,总电流为两条支路电流之和。化简后得到其本构方程为:

$$V(t) + \frac{C_a}{C_b} \tau^{\alpha-\gamma} \frac{d^{\alpha-\gamma} V(t)}{dt^{\alpha-\gamma}} + \frac{C_a}{C_b} \tau^{\beta-\gamma} \frac{d^{\beta-\gamma} V(t)}{dt^{\beta-\gamma}} = C_a \tau^\alpha \frac{d^\alpha Q(t)}{dt^\alpha} + C_a \tau^\beta \frac{d^\beta Q(t)}{dt^\beta} \quad (14)$$

式中, $C_a = C_1(\tau/\tau_1)^\alpha$; $C_b = C_3(\tau/\tau_3)^\gamma$ 。

对分数阶导数式(14)进行 Fourier 变换得到分数 Zener 模型的复电容:

$$C^*(\omega) = \frac{C_a}{(j\omega\tau)^\alpha + (j\omega\tau)^\beta} + \frac{C_b}{(j\omega\tau)^\gamma} \quad (15)$$

式中, $\tau = [C_2\tau_1^\alpha / (C_1\tau_2^\beta)]^{1/(\alpha-\beta)}$ 。

令 $\varepsilon_a = C_a/C_0$, $\varepsilon_b = C_b/C_0$, 有:

$$\varepsilon^*(\omega) = \frac{\varepsilon_a}{(j\omega\tau)^\alpha + (j\omega\tau)^\beta} + \frac{\varepsilon_b}{(j\omega\tau)^\gamma} \quad (16)$$

式(16)通过变换得到介电存储(实部)和介电损耗(虚部)的表达式分别为:

$$\varepsilon'(\omega) = X[(\omega\tau)^\alpha \cos(\pi\alpha/2) + (\omega\tau)^\beta \cos(\pi\beta/2)] + Y \cos(\pi\gamma/2) \quad (17)$$

$$\varepsilon''(\omega) = X[(\omega\tau)^\alpha \sin(\pi\alpha/2) + (\omega\tau)^\beta \sin(\pi\beta/2)] + Y \sin(\pi\gamma/2) \quad (18)$$

式中

$$\begin{cases} X = \frac{\varepsilon_a}{(\omega\tau)^{2\alpha} + (\omega\tau)^{2\beta} + 2(\omega\tau)^{\alpha+\beta} \cos[\pi(\alpha-\beta)/2]} \\ Y = \varepsilon_b(\omega\tau)^{-\gamma} \end{cases} \quad (19)$$

α, β, γ 为分数, $0 < \alpha, \beta, \gamma \leq 1$ 。

α 接近 1 时,其值影响 $\varepsilon'(\omega)$,从而影响松弛行为下降快慢程度, α 值越大下降越快。 β 接近 0 时,由于电容元件在低频极限下开路,高频极限下短路,在容阻器模型中, β 影响低频行为。 γ 接近 1 时,只影响松弛行为的低频端, γ 值越接近 1,对其影响越大。

ε_a 和 ε_b 是影响复介电常数实部和虚部的低频行为的常数。 ε_a 为 $\varepsilon'(\omega)$ 的低频极限,取值范围根据实测数据得到。 ε_b 越大则低频段下降越快,从而影响复介电常数的绝对值。

3 模型的参数辨识

3.1 优化目标函数的建立

为了获取分数阶 Zener 模型参数,需要建立优化目标函数实现对模型参数的优化^[24],使得分数 Zener 模型的计算值尽可能地与试验测量值相符合。在本文中,使用最小平方方法并通过最小化误差的平方和来探求数据的最佳函数匹配。在对分数 Zener 模型的模型值进行优化时,使频域特征量复介电常数实部和虚部的误差平方和同时为最小,各个参数也需要具有合理的物理意义。因此,本文建立有约束条件的优化目标函数,如式(20)所示:

$$J = \min \{ [\varepsilon'_M(\omega) - \varepsilon'_A(\omega)]^2 + [\varepsilon''_M(\omega) - \varepsilon''_A(\omega)]^2 \} \quad (20)$$

式中,约束 $0 < \alpha - \beta < 1$; $\varepsilon'_A, \varepsilon''_A$ 分别为测量复介电常数实、虚部的值; $\varepsilon'_M, \varepsilon''_M$ 分别为运用分数 Zener 模型计算复介电常数实、虚部的值。

3.2 试验方法

为得到参数辨识中的测量数据,研究分数 Zener 模型提取参数的方法,制取老化样本^[25]。制取 5 组不同老化程度的植物绝缘油纸试样。本文以普通牛皮纸板和武汉南瑞公司自主研发的植物绝缘油的组成为研究对象,并将普通牛皮纸板处理成直径为 130 mm 的圆盘,厚为 0.5 mm,随后将绝缘纸与植物绝缘油分别置于恒温 105 ℃/50 Pa 的干燥箱中真空干燥 48 h、72 h,利用高精密电子天平称重,通过计算控制干燥后的绝缘纸微水含量 < 0.15%。将处理后的植物油纸试样置于干燥的三电极装置中密封,在常温下浸油 48 h。随后进行加速老化试验,温度设置为 130 ℃,待老化天数达到 0, 7, 21, 28, 35 天时各取出一组油纸试样,并在 30 ℃ 下静置冷却 72 h。

将油纸试样置于 30 ℃ 的恒温箱中,测试前放电 2~3 h,随后使用 IDAX-300 绝缘测试仪对油纸试样进行 FDS 测量,测量频段取 0.1 mHz ~ 1 kHz。最后,取 3 次测试结果的平均值作为最终的测量数据。根据平行板电容公式,可以将电容频谱推导为复介电常数频谱。

图 3(a) 为植物油纸绝缘系统复介电常数实部与频率的曲线图。在 $10^{-4} \sim 10^{-1}$ Hz 内,实部曲线分散性不大,斜率基本保持一致,同一频率下,老化天数越大,实部的值越大,且增长幅度越大。这是由于植物油纸热老化时,纤维素纸与植物绝缘油充分接触形成了更多的油纸界面,从而导致界面极化加剧。同时随着纤维素纸不断劣化,生成的水分、糠醛、大小分子酸等产物提高了纤维素纸的电导率,减小了界面极化的时间,使得 ε' 向右平移。在频率 $10^{-1} \sim 10^3$ Hz 内,实部曲线差别不大,甚至发生重叠现象。

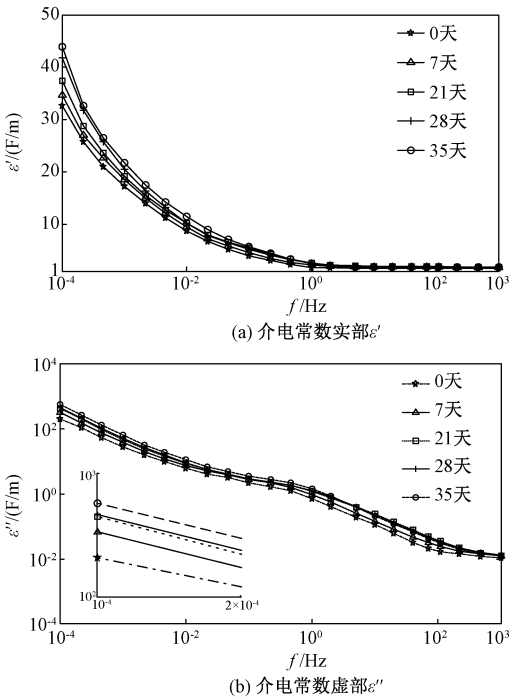


图 3 老化样品的 FDS 曲线
Fig.3 FDS curves of aged samples

图 3(b) 为植物油纸绝缘系统复介电常数虚部与频率的曲线图。在整个 $10^{-4} \sim 10^3$ Hz 频率范围内,曲线的分散性较大,斜率基本保持一致,同一频率下, ε'' 随着老化天数的增加而小幅度变大。主要原因可能是老化过程中,系统的极化和电导损耗增大了。植物油纸绝缘系统老化过程中,油和纸发生反应生成酯基,酯基与纤维素纸中水分产生反应的同时,生成物长链脂肪酸覆盖于纤维素表面,有阻止

水分影响纤维素的可能^[9]。

油中酸值的测定参照 GB/T5530-2005,为了尽量减小误差每一组样品同时测 3 次取平均值。见表 1,其中 a_v 表示油中酸值。

表 1 5 组老化样品油中酸值含量

Tab.1 Acid value content in five groups of aging samples

| 老化天数 | 0 | 7 | 21 | 28 | 35 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| $a_v/$ (mg(KOH)/g) | 0.162 | 0.274 | 0.735 | 1.004 | 1.633 |

注:单位“mg(KOH)/g”中的“KOH”指“氢氧化钾”。

3.3 验证分数 Zener 模型

为验证分数 Zener 模型的正确性,研究老化对油纸复合绝缘复介电常数频域谱的影响,采用分数 Zener 模型拟合图 3 中 7 天的测量数据,通过最小二乘法得到计算参数,并用 GA 算法和 PSO 算法进行优化计算,流程如图 4 所示。

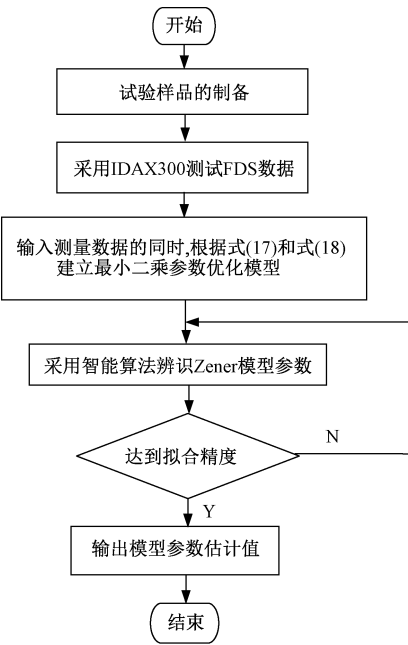


图 4 参数辨识流程图

Fig.4 Flow chart of parameter identification

图 5 给出了植物油纸试样 ε' 与 ε'' 的重构与测量 FDS 曲线之间的对比图。

由图 5 可见,基于分数 Zener 模型的两条重构曲线较贴合实测值,为进一步量化分析两种算法得到的结果与实测数据的关系,特引用拟合度指标来判断它们的重合程度,如式(21)和式(22)所示:

$$R_{\varepsilon'} = 1 - \sqrt{\frac{\sum (\varepsilon'_M - \varepsilon'_A)^2}{\sum \varepsilon'^2_A}}$$

(21)

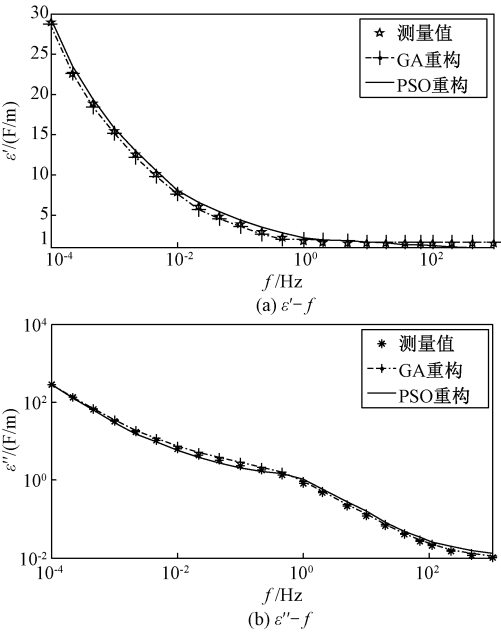


图 5 油纸试样实测与重构后曲线

Fig.5 Oil-paper sample measured and reconstructed curves

$$R_{\varepsilon''} = 1 - \sqrt{\frac{\sum (\varepsilon''_M - \varepsilon''_A)^2}{\sum \varepsilon''^2_A}}$$

(22)

计算得到实部的 $R_{\varepsilon'} = 97.34\%$ 、虚部的 $R_{\varepsilon''} = 97.87\%$,说明两条曲线基本吻合,辨识效果良好。表 2 给出了试样全频段和低频段相应的拟合度指标计算结果。

表 2 重构后油纸试样 ε' 与 ε'' 的重合度

Tab.2 Coincidence degree of oil-paper sample ε' and ε'' after reconstruction

| 算法 | 频段 | ε' 重合度 (%) | ε'' 重合度 (%) |
|-----|-----|------------------------|-------------------------|
| GA | 全频段 | 97.34 | 97.87 |
| | 低频段 | 98.03 | 98.31 |
| PSO | 全频段 | 95.60 | 97.14 |
| | 低频段 | 96.54 | 98.14 |

对比植物油纸试样复介电常数实、虚部的重构曲线与低频段的拟合度指标值,不难发现两种优化算法都能较好地优化分数 Zener 模型的模型参数,其中使用 GA 算法辨识出的分数 Zener 模型参数重构后的低频段 FDS 曲线更加贴合测量数据。因此,分数 Zener 模型能够准确地描述植物油纸复合绝缘的 FDS。

3.4 模型参数的分析

为获得更多分数 Zener 模型中与频域介电谱相关特征量 $\alpha\beta$ 、 γ 、 ε_a 、 ε_b 与 τ 的值。依照前文中的辨

识方法,由最小二乘法建立目标函数,经 GA 优化算法筛选出合适的模型未知量。采用式 (17) 和式 (18) 对图 3 中的实测数据进行曲线计算,得到图 3 中各曲线的模型参数值,如表 3 所示。

表 3 老化样品的参数拟合结果

| 老化天数 | 0 | 7 | 21 | 28 | 35 |
|-----------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| α | 0.293 | 0.309 | 0.306 | 0.317 | 0.267 |
| β | 0.057 | 0.083 | 0.132 | 0.196 | 0.225 |
| γ | 0.969 | 0.977 | 0.979 | 0.997 | 0.998 |
| $\varepsilon_a/(F/m)$ | 26.75 | 28.72 | 29.25 | 34.58 | 29.45 |
| $\varepsilon_b/(F/m)$ | 41.52 | 37.33 | 33.31 | 29.67 | 20.00 |
| τ/s | 226.8 | 207.7 | 136.6 | 102.1 | 88.97 |

由表 3 可知,形状参数 β 随着老化天数的增多而逐渐增大,且松弛时间 τ 也随着老化天数的增多而下降。老化使绝缘油的介电性能降低,更容易建立松弛极化,因此松弛时间 τ 随老化程度加深有所减小。参数 ε_b 随着老化天数的增多而变小。形状参数 α 的值位于 0.2~0.3 之间,形状参数 γ 接近于 1,参数 ε_a 无明显规律。由此,选用形状参数 β 、参数 ε_b 、松弛时间 τ 作为评估植物油纸老化状态的特征量。

植物油纸绝缘组合在加速老化实验中,会在热、水分、酸等各方面因素的影响下慢慢劣化。文献 [26] 指出了植物油中酸值与聚合度的单调关系,同时表明植物油纸绝缘系统老化程度是影响油中酸值上升的重要因素。为得到辨识出的分数 Zener 模型参数与油纸绝缘系统老化特征量的关系,选取油中酸值作为老化特征量与模型参数进行拟合。拟合关系式如表 4 所示。

表 4 模型参数与 a_v 的拟合公式

| Tab.4 Formulation of model parameters and a_v | | |
|---|--|----------|
| 模型参数 | 拟合函数关系式 | 拟合优度 R |
| β | $\beta=0.304-0.281\times0.447^{a_v}$ | 0.971 |
| ε_b | $\varepsilon_b=42.783-13.676a_v$ | 0.983 |
| τ | $\tau=72.209-207.601\times0.186^{a_v}$ | 0.991 |

对于油纸绝缘, ε_b 影响复介电常数绝对大小的参数, τ 为松弛时间,形状参数 β 影响低频极限值。老化程度会对分数 Zener 模型中 ε_b 和 τ 产生负相关影响,对 β 产生正相关影响。 ε_b 、 τ 和 β 分别与油中酸值的拟合图如图 6、图 7 所示。

结果表明,形状参数 β 和松弛时间 τ 与油中酸

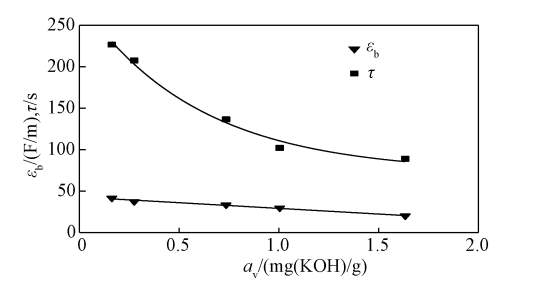


图 6 ε_b 和 τ 分别与 a_v 拟合的曲线图
Fig.6 ε_b and τ fitting curves of a_v

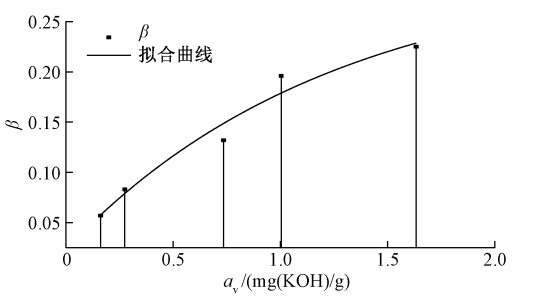


图 7 形状参数 β 与 a_v 的拟合曲线
Fig.7 Fitting curve of shape parameters β and a_v

值之间呈指数函数关系,而参数 ε_b 与油中酸值具有较好的线性关系,这三个参数能有效用于评估植物油纸绝缘系统的老化程度。

4 结论

本文基于分数微积分和电介质理论,采用分数 Zener 模型分析植物油纸绝缘系统频域介电谱特性,提出了该分数模型参数提取的方法,得出如下结论:

(1) 重构介电常数频率曲线与实测 FDS 曲线基本重合,且低频段更加精确,表明分数 Zener 模型可有效提取植物油纸绝缘频域介电谱特征量。

(2) 根据油中酸值 a_v 对分数 Zener 模型的三个参数 β 、 ε_b 、 τ 具有不同的影响规律,并结合现场的频域介电谱测试,可以制定分数 Zener 模型参数评估植物油纸绝缘老化状态的方法,为评估植物油纸绝缘老化状态提供新思路。

(3) 在实验室容易控制 FDS 测量时的温度,但在现场测试中,如何有效消除温度对 FDS 的影响以诊断运行变压器的绝缘状态,依然存在巨大问题。一方面要研究与温度相关的物理特征量,同时还需建立与实测数据的定量关系,这些都需要开展大量理论性研究。

参考文献 (References):

- [1] 辛建波, 康琛, 翁新林, 等 (Xin Jianbo, Kang Chen, Weng Xinlin, et al.). 基于聚类和时间序列分析的变压器状态评价方法 (Evaluation method of transformer state based on clustering and time series analysis) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2019, 47 (3): 64-70.
- [2] 叶荣, 蔡金锭 (Ye Rong, Cai Jinding). 基于弛豫贡献度的变压器油纸绝缘系统老化状态评估 (Evaluation of aging status of transformers oil-paper insulation system based on relaxation contribution degree) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (11): 15-22.
- [3] Rouse T O. Mineral insulating oil in transformers [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1998, 14 (3): 6-17.
- [4] Patrick M C. Vegetable-oil-based dielectric coolants [J]. IEEE Industry Applications Magazine, 2002, 8 (3): 34-41.
- [5] Sonkamble Anil A, Sonsale R P, Kanshette M S, et al. Relaxation dynamics and thermophysical properties of vegetable oils using time-domain reflectometry [J]. European Biophysics Journal, 2017, 46: 283-291.
- [6] 何清, 李亚飞, 王伟, 等 (He Qing, Li Yafei, Wang Wei, et al.). 植物绝缘油浸纸板电气性能的研究 (Study on electrical properties of vegetable insulating oil impregnated pressboard) [J]. 高压电器 (High Voltage Apparatus), 2017, 53 (11): 127-131.
- [7] 李庆民, 任鹏, 彭鹏, 等 (Li Qingmin, Ren Peng, Peng Peng, et al.). 基于活化能的绝缘老化评估方法研究进展 (Research advances of activation energy-based insulation aging assessment) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2020, 39 (3): 55-66.
- [8] 黄青丹, 莫文雄, 宋浩永 (Huang Qingdan, Mo Wenxiong, Song Haoyong). 植物油纸绝缘加速热老化特性研究 (Study on accelerated thermal aging characteristics of plant oil-paper insulation) [J]. 电工技术 (Electric Engineering), 2018, (2): 72-74, 76.
- [9] 张涛, 左倩, 任乔林, 等 (Zhang Tao, Zuo Qian, Ren Qiaolin, et al.). 油纸绝缘非标准极化谱的中心时间常数提取 (Central time constant of nonstandard polarization spectrum of oil-paper insulation) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2018, 22 (8): 82-88.
- [10] 王敬一, 蔡炜, 杨牧, 等 (Wang Jingyi, Cai Wei, Yang Mu, et al.). 基于介电响应的植物油纸绝缘热老化特性研究 (Study on thermal ageing characteristics of vegetable oil-paper insulation based on dielectric response) [J]. 绝缘材料 (Insulating Materials), 2018, (6): 60-65.
- [11] Komarov V, Wang S, Tang J. Encyclopedia of RF and microwave engineering: Permittivity and measurements [M]. John Wiley & Sons Inc, 2005.
- [12] Chaudhari S R. Relaxation study at microwave frequency using TDR [J]. International Journal Emergineering Science, 2013, 1 (11): 27-31.
- [13] Alcoutlabi M, Martinez-Vega J J. The effect of physical aging on the relaxation time spectrum of amorphous polymers: The fractional calculus approach [J]. Journal of Material Science, 1999, 34: 2361-2369.
- [14] 徐肖伟, 王科, 刘光祺, 等 (Xu Xiaowei, Wang Ke, Liu Guangqi, et al.). 介电模型的油浸式套管受潮状态评估 (Moisture assessment of oil-impregnated bushing based on Havriliak-Negami dielectric relaxation model) [J]. 云南电力技术 (Yunnan Electric Power), 2018, 46 (1): 126-130.
- [15] Havriliak S, Negami S. A complex plane representation of dielectric and mechanical relaxation processes in some polymers [J]. Polymer, 1967, 8: 161-210.
- [16] Hilfer R. Experimental evidence for fractional time evolution in glass forming materials [J]. Chemical Physics, 2002, 284: 399-408.
- [17] Reyes-Melo M E, Martinez Vega J J, Guerrero Salazar C A. Application of fractional calculus to the modeling of dielectric relaxation phenomena in polymeric materials [J]. Journal of Applied Polymer Science, 2005, 98: 923-935.
- [18] Sibatov R T, Uchaikin V V, Ambrozevich S A. Fractional derivative formalism for non-destructive insulation diagnosis by polarization-depolarization current measurements [J]. Journal of Vibration and Control, 2015, 22 (8): 2109-2119.
- [19] 李宗恩 (Li Zong'en). 油纸复合绝缘结构的分数阶模型及其应用研究 (A fractional model of oil-paper composite insulation structure and its application) [D]. 北京: 华北电力大学 (Beijing: North China Electric Power University), 2015.
- [20] 罗丹 (Luo Dan). 分数微积分在研究介电松弛中的应用 (The application of fractional calculus in study of dielectric relaxation) [D]. 西安: 西北师范大学 (Xi'an: Northwest Normal University), 2015.
- [21] 杨丽君, 齐超亮, 邓帮飞, 等 (Yang Lijun, Qi Chaliang, Deng Bangfei, et al.). 采用修正 Cole-Cole 模型提取油纸绝缘频域介电谱的特征参量方法 (Applica-

- tion of modified Cole-Cole model to extract characteristics of frequency dielectric spectroscopy of oil-paper insulation) [J]. 高电压技术 (High Voltage Engineering), 2013, 39 (2): 310-317.
- [22] Podlubny I. Fractional differential equations [M]. San Diego: Academic Press, 1999.
- [23] Baral A, Chakravorti S. A modified Maxwell model for characterization of relaxation processes within insulation system having non-uniform aging due to temperature gradient [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20 (2): 524-534.
- [24] 林智勇, 张达敏, 黄国泰, 等 (Lin Zhiyong, Zhang Damin, Huang Guotai, et al.). 采用回复电压曲线分解法的变压器等效电路研究 (Research on equivalent circuit of transformer by decomposing return voltage curve) [J]. 电力系统保护与控制 (Power System Protection and Control), 2019, 47 (13): 18-23.
- [25] 周远翔, 黄欣, 黄猛, 等 (Zhou Yuanxiang, Huang Xin, Huang Meng, et al.). 温度对油纸绝缘空间电荷消散特性的影响 (Influences of temperature on space charge dissipation in oil-paper insulation) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2018, 37 (7): 1-8.
- [26] 廖瑞金, 桑福敏, 刘刚, 等 (Liao Ruijin, Sang Fumin, Liu Gang, et al.). 变压器不同油纸绝缘组合加速老化时油中水分和酸值含量研究 (Study on neutral acid and water dissolved in oil for different types of oil-paper insulation compositions of transformers in accelerated ageing tests) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2010, 30 (4): 125-131.

Study on condition evaluation of vegetable oil-paper insulation based on fractional Zener model

ZHANG Tao¹, ZHANG Chen¹, WANG Shuo², REN Qiao-lin³, XIAO Sa³

(1. College of Electrical Engineering and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

2. Hubei Provincial Engineering Technology Research Center for Power Transmission Line, China Three Gorges University, Yichang 443002, China;

3. State Grid Hubei Electric Power Company Xiaogan Power Supply Company, Xiaogan 432100, China)

Abstract: The frequency domain spectroscopy method of dielectric response theory can effectively assess the insulation condition of transformers. Therefore, in order to quantitatively study the relationship between aging of vegetable oil-paper insulation and frequency domain spectrum, the fractional Zener model is used to extract the characteristic quantities of the frequency domain spectrum of vegetable oil-paper insulation, with the concept of fractional element and fractional calculus introduced in this paper. This method can directly reflect the information carried by the frequency domain spectrum of oil-paper insulation, and obtain the parameters of fractional Zener model by using the complex permittivity obtained by the experiment. Firstly, the least square method is used to establish the optimization objective function. Then, the model parameters are obtained by using genetic algorithm, which contain the shape parameter β , parameter ε_b and relaxation time τ . The results are verified by particle swarm optimization algorithm. Finally, the calculation results are reconstructed. The results show that the simulation results are in good agreement with the measured data and the R-squared in low frequency is higher, which shows the suitability of this model. It is proved that the relation between shape parameter β , relaxation time τ and acid value in the oil is exponential. The parameter ε_b has a linear relationship with the acid value in the oil. Therefore, a new idea for evaluating the insulation state of vegetable oil-paper insulation systems is provided.

Key words: vegetable oil-paper insulation; fractional calculus; fractional Zener model; frequency domain spectroscopy; complex permittivity