

# 基于 Havriliak-Negami 介电模型的油纸绝缘老化参数提取

云浩<sup>1</sup>, 李亮<sup>2</sup>, 丁宁<sup>3</sup>, 张益舟<sup>1</sup>, 石岩<sup>2</sup>, 张大宁<sup>3</sup>

(1. 中核武汉核电运行技术股份有限公司, 湖北 武汉 430000; 2. 江苏核电有限公司, 江苏 连云港 222000; 3. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西 西安 710049)

**摘要:** 电力变压器是电能传输中最重要的设备之一, 检测变压器老化状态具有重要意义。为了对变压器内油纸绝缘的老化状态进行有效评估, 文中通过频域介电谱法(FDS)研究了不同老化程度下油纸绝缘的介电特性, 并通过引入 Havriliak-Negami (H-N) 模型建立了特征参量与老化时间之间的关系, 最后将此方法应用于现场变压器的测试, 进行了验证。结果表明: 随着老化程度的加深, FDS 曲线在高、低频段变化不明显, 中频段显著增大, 总体曲线呈“枣核”状; 依据 H-N 模型提取的特征参量与老化程度具有良好的对应关系; 对现场变压器的应用验证了此方法对于评估变压器老化状态的可行性。

**关键词:** 油纸绝缘; 老化; 频域介电谱; Havriliak-Negami 模型; 特征参量

中图分类号: TM855

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)02-0147-07

## 0 引言

电力变压器主要承担电力主干网的电能输送任务, 是电力系统中最为核心、最为重要的系统设备<sup>[1-2]</sup>。目前, 大型变压器的绝缘主要采用油浸纸复合绝缘结构。由于电、热、化学等因素的影响, 变压器运行时电气和机械性能会有所下降<sup>[3-5]</sup>, 情况严重时, 甚至可能造成停电事故<sup>[6-7]</sup>。

油纸绝缘设备传统检测方法有绝缘电阻、工频下的介损、电容量、油中溶解气体分析、糠醛以及取样纸进行聚合度分析等。然而这些方法均存在不足, 例如绝缘纸聚合度测试会对绝缘造成损伤, 油中化学量测量法会由于中途滤油等因素无法反映正常的绝缘状况。近年来, 一种新的基于介电响应的油纸绝缘状态评估方法逐渐受到关注。该评估方法主要包括回复电压法<sup>[8]</sup>、极化去极化电流法<sup>[9]</sup>和频域介电谱法(frequency domain spectroscopy, FDS)<sup>[10-11]</sup>。其中回复电压法只能整体评估绝缘的老化状态, 无法区分油纸各自的状态; 极化去极化电流法易受外界干扰且记录数据困难<sup>[12]</sup>; 而 FDS 法由于测量电压低、携带信息丰富、抗干扰能力强而得到广泛应用<sup>[13]</sup>。

国内外学者针对利用 FDS 法监测油纸绝缘的状态进行了广泛研究。重要途径之一是通过提取介电谱中的特征参量, 利用拟合方程建立老化状态与特征参量的联系, 从而达到对变压器绝缘状态的

有效评估。文献[14]利用油纸绝缘等效电路模型, 以模型参量的变化来分析绝缘油纸含水量的变化趋势。文献[15]采用修正的 Cole-Cole (C-C) 模型研究了拟合过程中参数的初始值选取方法和目标函数的建立, 并研究了温度对各个参量的影响规律。文献[16]研究了基于 Davidson-Cole (D-C) 模型的老化特征参数提取方法, 建立了老化状态与特征定量函数的关系。文献[17]采用 Havriliak-Negami (H-N) 模型对介电频谱进行了计算拟合, 并分析了水分质量分数、温度及聚合度对 H-N 介电弛豫模型参数的影响。当前对油纸绝缘的评估较多关注的是如何利用介电响应法评估油纸绝缘的含水量, 而对热老化这个因素研究较少, 且绝大部分研究仅局限于实验室内, 未涉及现场应用。

文中通过 FDS 法测试了不同热老化状态下油纸绝缘的介电谱曲线, 并依据电介质理论进行了分析。随后基于普适的 H-N 模型提取相应的特征参数, 建立其与老化时间的关系。最后对现场变压器的特征量进行了提取, 验证了此方法的有效性。

## 1 电介质基础理论

### 1.1 FDS 理论

首先, 为了说明电介质材料对于电场激励的响应, 引入介质响应函数  $f(t)$ , 对处于真空中的极板施加电场  $E(t)$ 。其对应的电流密度  $j(t)$  为:

$$j(t) = \sigma_0 E(t) + \epsilon_0 \frac{dE(t)}{dt} + \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_0^t f(t - \tau) E(\tau) d\tau \quad (1)$$

收稿日期: 2020-09-07; 修回日期: 2020-10-13

基金项目: 国家自然科学基金委员会-中国物理工程研究院联合基金资助项目(U1830129)

式中： $\varepsilon_0$ 为真空介电常数； $\sigma_0$ 为直流电导率。介质响应函数的傅里叶变换是 $\chi(\omega)$ ，将式(1)变换至频域可得：

$$j(\omega) = \{ \sigma_0 + i\omega\varepsilon_0[1 + \chi'(\omega) - i\chi''(\omega)] \} E(\omega) = \{ \sigma_0 + \omega\varepsilon_0\chi''(\omega) + i\omega\varepsilon_0[1 + \chi'(\omega)] \} E(\omega) \quad (2)$$

式中： $\omega$ 为频率； $\chi'(\omega)$ 为复极化率实部； $\chi''(\omega)$ 为复极化率虚部。

由式(2)得相对介电常数为：

$$\varepsilon_r(\omega) = \varepsilon'_r(\omega) - i\varepsilon''_r(\omega) = 1 + \chi'(\omega) - i\chi''(\omega) \quad (3)$$

所以，介质损耗角正切  $\tan \delta(\omega)$  表示如下：

$$\tan \delta(\omega) = \frac{\varepsilon''_r(\omega)}{\varepsilon'_r(\omega)} = \frac{\chi''(\omega)}{1 + \chi'(\omega)} \quad (4)$$

式(4)中介质损耗角正切计算只考虑了极化损耗，而实际对样品或设备的测量中电导损耗也包含在内。实际测量的介质损耗正切值表示如下：

$$\tilde{\varepsilon}_r(\omega) = \varepsilon'_r(\omega) - i\varepsilon''_r(\omega) = \varepsilon'_r(\omega) - i[\varepsilon''_r(\omega) + \sigma_0/(\varepsilon_0\omega)] = 1 + \chi'(\omega) - i[\chi''(\omega) + \sigma_0/(\varepsilon_0\omega)] \quad (5)$$

所以实际测量的介质损耗正切角为：

$$\tan \delta = \frac{\varepsilon''_r(\omega)}{\varepsilon'_r(\omega)} = \frac{C''(\omega)}{C'(\omega)} = \frac{\varepsilon''(\omega) + \sigma_0/(\varepsilon_0\omega)}{\varepsilon'_r(\omega)} \quad (6)$$

式中： $C''(\omega)$ 为复电容虚部； $C'(\omega)$ 为复电容实部。

## 1.2 H-N 模型理论

在现有的针对油纸绝缘系统的频域谱测试方法中，起主要作用的是弛豫极化。电介质材料吸潮或老化降解后，其弛豫特性会发生显著变化，介电响应技术就是利用这种特性对油纸绝缘的状态进行诊断和评估。经典的 Debye 模型可用来解释介电响应，这在单一的铁电体及稀释溶液介质中得到了验证。但在实际的复合介质介电响应中存在着非 Debye 弛豫现象，这可以通过引入 H-N 模型来进行解释。另一方面，油纸绝缘的热老化会使极性分子增加，极化过程进一步增强；加剧复合介质的界面极化；产生水分和小分子酸，增加电导损耗。H-N 模型能够描述多个极化和电导过程，更准确地解释复合绝缘的介电响应。对于偶极子主导的松弛极化而言，复极化率 $\chi^*(\omega)$ 的普适模型如下：

$$\chi^*(\omega) = \frac{X_0}{[1 + (j\omega\tau)^\alpha]^\beta} \quad (7)$$

式中：参数 $\alpha$ 和 $\beta$ 取决于介电响应曲线的形状； $X_0$ 为静电场下极化强度的幅值。

若 $\alpha=\beta=1$ ，该公式可以简化为经典的 Debye 模型。若 $\alpha \neq 1$ 且 $\beta=1$ ，该公式变为 C-C 响应模型。

若 $\alpha=1$ 且 $\beta \neq 1$ ，该公式则变为 D-C 弛豫模型。若 $\alpha \neq 1$ 且 $\beta \neq 1$ ，该公式则变为 H-N 模型。考虑到实际直流电导和跳跃电导的影响，此处使用一种普适介质极化 $\chi^*(\omega)$ 模型，具体如下：

$$\chi^*(\omega) = \sum_m \frac{X_{m0}}{[1 + (j\omega\tau_m)^{\alpha_m}]^{\beta_m}} + \sum_n \frac{A_n}{(j\omega)^{\gamma_n}} \quad (8)$$

式中： $m, n$ 为偶极子极化、直流电导或者跳跃电导过程的数目； $A_n$ 为低频区域电导幅值大小。

复介电常数 $\varepsilon^*$ 可以由复电容测试获得：

$$\varepsilon^* = \frac{C^*}{C_0} = \frac{C' - jC''}{C_0} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (9)$$

式中： $C_0$ 为设备的几何电容或者其在高频时的电容。极化率 $\chi^*$ 和复介电常数 $\varepsilon^*$ 之间的关系如下：

$$\chi^*(\omega) = \varepsilon^* - \varepsilon_{\text{hf}} \quad (10)$$

式中： $\varepsilon_{\text{hf}}$ 为光频或者高频时的介电常数。

按照上述公式即可从测量的复电容 $C^*$ 中提取极化率 $\chi^*(\omega)$ 。

根据上述拟合方法，可以获得测试曲线的电导特性参量( $A_n, \gamma_n$ )，弛豫特性参量( $X_m, \alpha_m, \beta_m, \tau_m$ )。通过研究测试曲线的电导特性参量和弛豫特性参量的变化，可以评估油纸绝缘老化程度的变化情况。

## 2 FDS 实验

### 2.1 实验平台搭建

为了保证足够的测试精度，对油纸绝缘模型进行 FDS 测试时采用典型的三电极测试结构<sup>[18]</sup>，具体如图 1 所示。高压电极和保护电极的外直径为 120 mm，测量电极的直径为 100 mm，保护电极内径为 110 mm，电极均采用黄铜制成。

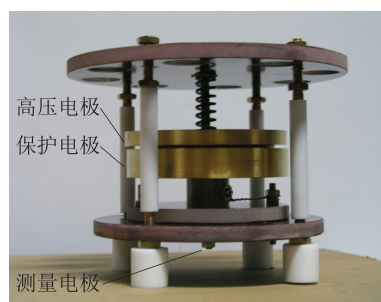


图 1 实验电极

Fig.1 Experimental electrode

根据 FDS 的测试要求，须同时满足真空测试环境、温度控制、样品干燥等功能，文中对真空干燥箱进行了实验改造，搭建了真空温控测试平台。该烘箱真空度 0.01 mbar，温控范围为 5~200 °C，温度波动范围 $\pm 0.4$  °C，内室尺寸为 433 mm×505 mm×459

mm。除此之外,所选的 FDS 测试仪具有良好的电磁屏蔽特性,抗干扰能力较强,保证测试接线准确无误后,通过计算机终端设置测试参数后可开展相关实验。实验室环境下针对油纸绝缘的 FDS 测试系统如图 2 所示。

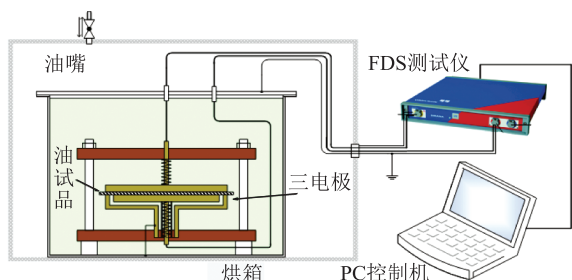


图2 测试系统

Fig.2 Test system

## 2.2 实验试品的制备

由于大部分变压器的主绝缘为油纸绝缘,文中制作了不同老化程度的油浸纸单元叠层老化模型。实验材料为新疆克拉玛依 25 号环烷基矿物新油和 0.13 mm 厚的绝缘纸。

为了能最大程度地模拟实际变压器的绝缘结构,将 0.13 mm 厚的绝缘纸裁剪为长 600 mm,宽 100 mm 的绝缘纸条,每 2 条互相交叠 4 次形成 1 个单元叠层。将真空干燥箱内壁用酒精清洁干净,并烘干 5 h,使其内部处于干燥状态。将制备好的样品置于烘箱内在 105 °C 下干燥 24 h,然后擦去烘箱内壁的水露,再次抽真空干燥 48 h,得到干燥的绝缘纸样品。以同样的干燥流程通过另一烘箱对变压器油进行干燥。最后将单元叠层放入干燥好的变压器油中真空浸渍 48 h,充分浸渍后得到油浸纸单元叠层样品。

由文献[19]提出的热老化 6 度规则以及 IEC 60354 油浸式电力变压器负载导则相关规定可知,温度每增加 6 K,老化速率增加 1 倍。所以实验采取了加速老化的方法,以求在较短时间内最大程度地模拟变压器实际长时间运行的绝缘老化状态。老化温度设定为 140 °C,绝缘油所测得的闪点温度约为 168 °C,因此实验所设置的温度并不影响其老化机理。

老化时间分别设置为 0 h, 100 h, 200 h, 300 h, 400 h, 600 h, 800 h, 共得到 7 种不同老化程度的样品。选取 0 h, 50 h, 200 h, 400 h, 800 h 这 5 个状态的油与纸进行理化特性分析,结果如表 1 所示,其中 DP 为绝缘纸聚合度,介电损耗因数均为 90 °C 下数值。之后将不同老化程度的样品在 30~70 °C 下进行 FDS 测试,具体流程如图 3 所示。

表 1 老化样品的理化特性分析

Table 1 Analysis of physical and chemical characteristics for aged samples

| 老化时间/h | DP  | 油中微水/<br>(mg·L <sup>-1</sup> ) | 油酸值/<br>(mgKOH·g <sup>-1</sup> ) | 体积电阻<br>率/(Ω·m)      | 介质损耗<br>因数 |
|--------|-----|--------------------------------|----------------------------------|----------------------|------------|
| 0      | 857 | 4                              | 0.006                            | 1.6×10 <sup>11</sup> | 0.001 5    |
| 50     | 559 | 6                              | 0.018                            | 1.5×10 <sup>11</sup> | 0.001 8    |
| 200    | 428 | 15                             | 0.029                            | 1.2×10 <sup>11</sup> | 0.002 7    |
| 400    | 358 | 21                             | 0.049                            | 7.7×10 <sup>10</sup> | 0.005 2    |
| 800    | 311 | 25                             | 0.086                            | 6.0×10 <sup>10</sup> | 0.012 0    |

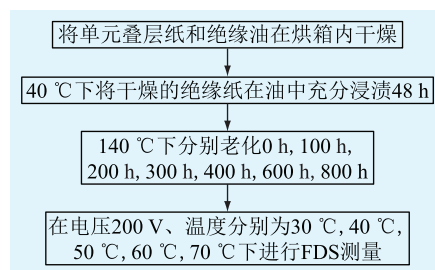


图3 实验流程

Fig.3 Experiment process

## 3 油纸绝缘介电谱结果分析

### 3.1 FDS 测量结果

根据 2.1 节中的实验平台以及测量流程,可以得到 FDS 测量结果曲线。现对测量结果从微观的电介质理论进行分析。

30 °C 下不同老化程度单元油浸纸试品的 FDS 特性曲线如图 4 所示。由图 4(a)可以看出随着老化程度的加深,试品的  $\tan \delta-f$  曲线呈增大趋势。在低频区域曲线呈收缩势,在中低频区域呈明显增大的趋势,在高频区域基本不变,双对数坐标下试品的  $\tan \delta-f$  曲线在整个测试频段范围内呈“枣核”型。

油纸绝缘的损耗主要由电导损耗和极化损耗组成。由介质的极化特性可知,在高频区主要是偶极子极化损耗;在中频区是由电导损耗和夹层界面极化损耗共同作用;在低频区主要是电导损耗<sup>[20]</sup>。油纸绝缘老化会产生有机酸,通常纸老化产生低分子酸,主要成分包括甲酸、乙酸和乙酰丙酸等,其作用与水分相似,并且与水分、纤维素有较好的亲和性;而油老化产生高分子酸,主要成分包括环烷酸和硬脂酸,憎水性较强。

由于水分含量较低,小分子酸电离与杂质水解作用下降,带电离子数量较少,主要以分子形态游离于变压器油中。损耗主要以转向极化为主,对电导损耗的贡献较小,因此不同老化状态下介损曲线尾部(1 mHz 左右)变化不大,呈现“收缩”状态。

小分子酸与大分子酸的产生使得单位体积内

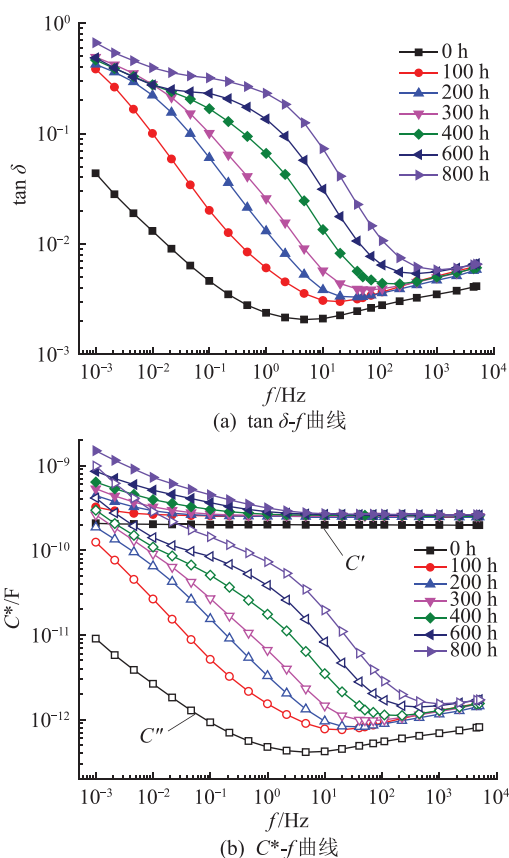


图4 30 °C下不同老化程度样品的FDS特性曲线  
Fig.4 FDS characteristic curves of samples with different degrees of aging at 30 °C

参与极化过程的分子数目增多,老化后纤维素长链断裂形成更丰富的油纸两相界面,导致油纸夹层界面极化得到加强,界面极化时间常数减小,进而使得  $\tan \delta$ - $f$  曲线在中频区逐渐增大凸起。

水分含量低,有机酸等老化附加产物极性没有水分极性且体积较大,转向极化过程相比水分要更加困难,导致在高频区域由老化产物造成的转向极化跟不上外电场变化周期,转向极化损耗增加很微弱,因此高频区的曲线变化并不明显。

由图4(b)可以看出,老化对高频段(100 Hz~5 kHz)  $C^*$ - $f$  曲线基本无影响,低频段内随着老化程度的加重,电容增大,老化程度越深,曲线开始上翘的频率越高。绝缘纸中纤维素随老化分解为小分子极性产物,增强了油纸界面束缚电荷的能力,所以  $C'$  增大,较大的极化时间常数对  $C^*$ - $f$  曲线的影响主要集中在低频段。由于复电容虚部表征电介质的损耗,所以  $C''$ - $f$  曲线变化规律与  $\tan \delta$ - $f$  曲线保持一致。

另外,在其他温度下测量的 FDS 曲线与图4中趋势相同,限于篇幅,此处不再一一列举。

### 3.2 老化特征参数的提取

由1.2节可知,根据引入的普适的 H-N 模型,从

测得的复电容随频率变化曲线对油纸绝缘老化特征参量进行提取。

根据式(8),将描述曲线的相关特征参数列于表2。考虑到现实测试中可能包含多个极化过程,所以在曲线特征提取时使用了2种极化参数,其分别表示低频极化和高频极化过程。利用 Matlab 最小二乘法拟合实际测试结果,并进行参数提取。

表2 改进 H-N 模型的特征参数  
Table 2 Characteristic parameters of improved H-N model

| 特征参量                   | 物理意义             |
|------------------------|------------------|
| $A_1$                  | 低频区域电导幅值         |
| $\gamma_1$             | 低频区域电导曲线斜率       |
| $A_2$                  | 高频区域电导幅值         |
| $\gamma_2$             | 高频区域电导曲线斜率       |
| $\epsilon_{\text{hf}}$ | 光频介电常数           |
| $X_{\text{sa}1}$       | 高频区域极化幅值         |
| $a_1$                  | 高频区域极化形状参数(平坦度)  |
| $\tau_{a1}$            | 高频区域极化时间常数       |
| $\beta_1$              | 高频区域极化形状参数(不对称度) |
| $X_{\text{sa}2}$       | 低频区域极化幅值         |
| $a_2$                  | 低频区域极化形状参数(平坦度)  |
| $\tau_{a2}$            | 低频区域极化时间常数       |
| $\beta_2$              | 低频区域极化形状参数(不对称度) |

实测曲线和拟合曲线的对比见图5。可以看出测试曲线与模型曲线重合度较高,曲线拟合效果较好。

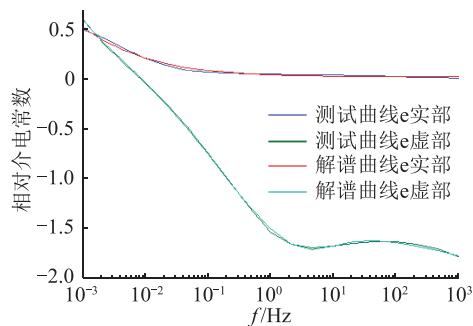


图5 老化100 h 试样复介电常数拟合曲线  
Fig.5 Fitting curve of complex permittivity of aged 100 h samples

由拟合结果发现,多个特征参数与绝缘纸板的老龄化程度具有较好的相关性,如低频电导参数  $A_1$  与  $\gamma_1$ , 高频极化参数  $X_{\text{sa}2}$ ,  $\tau_{a2}$  以及高频介电常数  $\epsilon_{\text{hf}}$ 。限于篇幅,文中给出了以上4种参量与老化时间的对应关系,如图6所示。

图6中,  $A_1$  随老化时间的增长整体呈现上升的趋势,这是因为老化过程中会产生低分子酸等老化产物,这些产物会影响变压器油的电导,使电导损

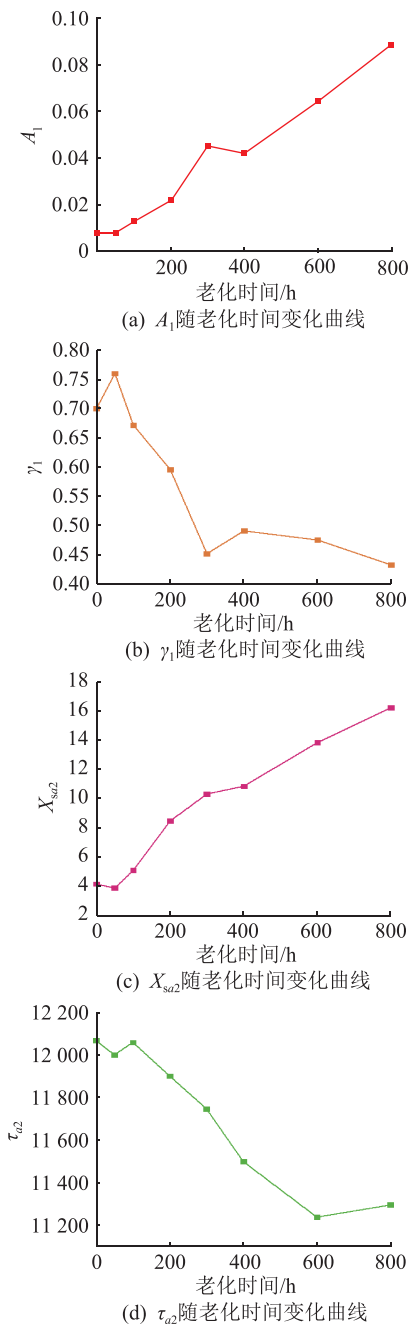


图6 各特征参量随老化时间变化关系  
Fig.6 The relationship between characteristic parameters and aging time

耗增大。而  $\gamma_1$  则随老化时间增长而呈现下降的趋势,说明通过 FDS 测试得到的介损曲线向右上方移动,这与实际测试得到的结果一致;另一方面,  $X_{su2}$  和  $\tau_{a2}$  随老化时间的增加分别增大和减小。这是因为随着老化程度的加深,绝缘纸板的结构更加疏松,产生的极化产物容易在油纸界面积累,加剧界面极化损耗,致使  $X_{su2}$  呈现逐渐增大的趋势,同时老化使绝缘纸的主要成分纤维素裂解为更小的分子,使其转向极化更容易进行,同时转向速度也增大,导致了时间常数  $\tau_{a2}$  呈减小的趋势。故提取的  $A_1$ ,

$\gamma_1, \varepsilon_{hf}, X_{su2}, \tau_{a2}$  具备作为老化特征量的基本资格。

### 3.3 现场电力设备老化特征量的提取

为验证文中建模处理方法,对 30 余个变压器进行特征量提取。这些变压器的运行时间最短为 1 a, 最长为 38 a, 时间跨度广且生产厂家不同,具有良好的代表性。利用 Matlab 中 lsqcurvefit 函数,依据 H-N 模型,对测试曲线进行拟合,并对提取的特征参数与老化年限之间关系的进行整理,具体见图 7。

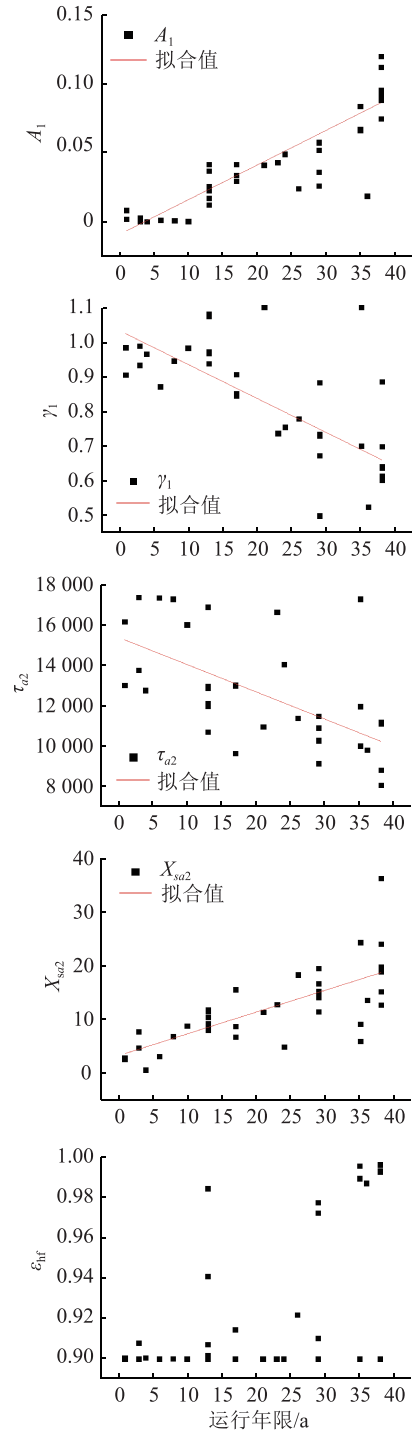


图7 不同运行年限变压器 FDS 拟合参量  
Fig.7 FDS fitting parameters of transformers with different service life

由于高频介电常数与运行年限的相关性较差,故不选为实际评估参数,无需拟合。从图中可以看出,随着运行年限的增加,主导低频区域的电导幅值  $A_1$  随运行年限的增加而增大,而其低频区域电导曲线斜率  $\gamma_1$  则逐步减小。曲线斜率  $\gamma$  代表 FDS 测试曲线的斜率,这说明 FDS 测试曲线低频区域的介损斜率增加,曲线向上方移动,该结果与实验室老化结果一致。

与  $A_1, \gamma_1$  相比较,高频介电常数  $\varepsilon_{hf}$  随变压器老化变化的规律并不明显,且幅值变化小。而低频区域极化时间常数  $\tau_{a2}$  以及低频区域极化幅值  $X_{sa2}$  分别与变压器运行年限之间具有较好的规律,即随运行年限的增长,  $X_{sa2}$  和  $\tau_{a2}$  分别呈现增大和减小的趋势。这是因为当油纸绝缘老化时,其纤维素变得松散,界面极化增强,低频区域极化幅值  $X_{sa2}$  增大。而老化时间的增加导致绝缘纸的聚合度下降,纤维素小分子化,转向极化更容易进行,对应的低频区极化时间常数  $\tau_{a2}$  减小。

对比现场电力设备与实验室下油纸绝缘特征参数随老化时间的变化情况,发现两者规律一致。此外,由于现场测试时,变压器的结构相对实验室条件下的油纸绝缘更加复杂,同时周围的电磁环境等因素也会对测试设备造成干扰,因此该参数在现场试验中规律存在一定的误差,但该变化依然符合理论模型的变化规律。因此,  $A_1, \gamma_1, X_{sa2}, \tau_{a2}$  具备作为老化特征参量的条件。

#### 4 结论

文中研究了油纸绝缘的 FDS 特性随不同老化程度的变化情况,并依据 H-N 模型对特征参量进行了提取,建立了其与老化时间之间的联系,最后通过现场变压器的测试进行验证。得到以下结论:

(1) 随着老化程度的加深,油纸绝缘会产生低分子酸和高分子酸。由于水分含量较低,低频区电导损耗贡献较小,所以呈收缩状;中频区由于界面损耗逐渐加强而增大凸起;有机酸等老化产物体积较大,转向困难,极化损耗增加微弱,所以高频区变化不明显。FDS 曲线总体呈“枣核”状。

(2) 依据改进的 H-N 模型对测量的 FDS 曲线进行了特征参量的提取,结果表明所提取的特征参量  $A_1, \gamma_1, \varepsilon_{hf}, X_{sa2}, \tau_{a2}$  与老化时间具有良好的相关性。

(3) 依据同样的方法对现场变压器进行了特征参量的提取,验证了文中方法的适用性,为实际变压器的老化状态检测提供了参考。

#### 参考文献:

- [1] 廖瑞金,杨丽君,孙才新,等. 基于局部放电主成分因子向量的油纸绝缘老化状态统计分析[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(14):114-119.  
LIAO Ruijin, YANG Lijun, SUN Caixin, et al. Aging condition assessment of oil-paper based on principal component and factor analysis of partial discharge [J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(14):114-119.
- [2] 岂小梅. 变压器绕组变形的综合判断及经验总结[J]. 电网技术, 2006,30(S1):220-222.  
QI Xiaomei. Synthetic diagnosis and experience about winding deformation of transformer [J]. Power System Technology, 2006,30(S1):220-222.
- [3] 廖瑞金,冯运,杨丽君,等. 油纸绝缘老化特征产物生成速率研究[J]. 中国电机工程学报, 2008,28(10):142-147.  
LIAO Ruijin, FENG Yun, YANG Lijun, et al. Study on generation rate of characteristic products of oil-paper insulation aging [J]. Proceedings of the CSEE, 2008,28(10):142-147.
- [4] 杨丽君,廖瑞金,孙会刚,等. 油纸绝缘热老化特性及生成物的对比分析[J]. 中国电机工程学报, 2008,28(22):53-58.  
YANG Lijun, LIAO Ruijin, SUN Huigang, et al. Contrasting analysis and investigation on properties and products of oil-paper during thermal aging process [J]. Proceedings of the CSEE, 2008,28(22):53-58.
- [5] 郑一鸣,何文林,孙翔,等. 基于油色谱超立方映射的电力变压器缺陷援例诊断模型[J]. 电力工程技术, 2017,36(4):48-53.  
ZHENG Yiming, HE Wenlin, SUN Xiang, et al. Case based power transformer defects diagnose model using hypercube mapping of oil chromatography [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017,36(4):48-53.
- [6] 陆宇航,杜伯学,朱晓辉. 基于匹配滤波法的超高频局部放电信号检测[J]. 电网技术, 2008,32(17):84-89.  
LU Yuhang, DU Boxue, ZHU Xiaohui. Ultra high-frequency partial discharge detection based on matched filter algorithm [J]. Power System Technology, 2008,32(17):84-89.
- [7] 王永强,律方成,李和明. 基于粗糙集理论和贝叶斯网络的电力变压器故障诊断方法[J]. 中国电机工程学报, 2006,26(8):137-141.  
WANG Yongqiang, LYU Fangcheng, LI Heming. Synthetic fault diagnosis method of power transformer based on rough set theory and Bayesian network [J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(8):137-141.
- [8] SAHA T K, YAO Z T. Experience with return voltage measurements for assessing insulation conditions in service aged transformers [J]. IEEE Power Engineering Review, 2002,22(8):70.
- [9] SAHA T K, PURKAIT P. Investigation of polarization and depolarization current measurements for the assessment of oil-paper insulation of aged transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004,11(1):144-154.
- [10] FARAHANI M, BORSI H, GOCKENBACH E. Dielectric response studies on insulating system of high voltage rotating

- machines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2006, 13(2):383-393.
- [11] ZAENGL W S. Dielectric spectroscopy in time and frequency domain for HV power equipment I: theoretical considerations [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(5):5-19.
- [12] 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.
- DONG Ming, LIU Yuan, REN Ming, et al. Study of characteristic parameter extraction and insulation condition correlation of frequency-domain dielectric spectroscopy for oil-paper insulation systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(23):6246-6253.
- [13] SONERUD B, BENGTSSON T, BLENNOW J, et al. Dielectric response measurements utilizing semi-square voltage waveforms [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4):920-926.
- [14] KOCH M, KRUEGER M, TENBOHLEN S. On-site methods for reliable moisture determination in power transformers [C]// IEEE PES T&D 2010. New Orleans, LA, USA. IEEE, 2010: 1-6.
- [15] 杨丽君,齐超亮,邓帮飞,等. 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[J]. 高电压技术, 2013, 39(2):310-317.
- YANG Lijun, QI Chaoliang, DENG Bangfei, et al. Application of modified cole-cole model to extract characteristics of frequency dielectric spectroscopy of oil-paper insulation[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):310-317.
- [16] 刘骥,尹梦涵,李秀婧,等. 油纸绝缘老化评估的 Davidson-Cole 模型参数提取方法[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(3):63-70.
- LIU Ji, YIN Menghan, LI Xiujing, et al. Parameters extraction of Davidson-Cole model on aging assessment of oil-paper insulation[J]. Electric Machines and Control, 2017, 21(3):63-70.
- [17] 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.
- [18] 吕玮. 基于介电频谱法的油纸绝缘微水含量研究[D]. 成都:西南交通大学, 2011.
- LYU Wei. Analysis on moisture in oil-paper insulation using frequency domain spectroscopy[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2011.
- [19] MONTSINGER V M. Loading transformers by temperature[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1930, 49(2):776-790.
- [20] 张大宁,刘孝为,詹江杨,等. 变压器油纸绝缘频域介电谱的虚部分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4):847-854.
- ZHANG Daning, LIU Xiaowei, ZHAN Jiangyang, et al. Analysis of imaginary part of frequency domain spectroscopy for oil-paper insulation transformer [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4):847-854.

#### 作者简介:



云浩

云浩(1989),男,硕士,工程师,从事核电厂电仪设备状态检测与老化管理工作(E-mail:yunhao@cnp.com.cn);

李亮(1988),男,学士,工程师,从事大型电力变压器管理工作;

丁宁(1996),男,硕士在读,研究方向为电力设备绝缘状态监测及评估。

## Extraction of oil-paper insulation aging parameters based on Havriliak-Negami dielectric model

YUN Hao<sup>1</sup>, LI Liang<sup>2</sup>, DING Ning<sup>3</sup>, ZHANG Yizhou<sup>1</sup>, SHI Yan<sup>2</sup>, ZHANG Daning<sup>3</sup>

(1. China Nuclear Power Operation Technology Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. Jiangsu Nuclear Power Co., Ltd., Lianyungang 222000, China; 3. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China)

**Abstract:** Power transformer is one of the most important equipments in power transmission, and it is of great significance to detect the aging state of transformers. In order to effectively evaluate the aging condition of oil paper insulation in transformers, the dielectric properties of oil-paper insulation under different aging degrees are studied by frequency domain spectroscopy (FDS). Besides, the relationship between the characteristic parameters and aging time is established by Havriliak-Negami (H-N) model. Then, this method is applied to the field transformer test. The results show that with the deepening of aging degree, the FDS curve increases significantly in the middle frequency band, but does not change significantly in the high and low frequency bands. The overall curve is in the shape of 'jujube nucleus'. According to the H-N model, the characteristic parameters have a good correspondence with the aging degree. This method that evaluates the aging condition of transformers is verified by the application of the field transformer.

**Keywords:** oil-paper insulation; aging; frequency domain spectroscopy; Havriliak-Negami model; characteristic parameter

(编辑 方晶)