

# 电机线棒环氧云母绝缘老化特性研究

戈宝军, 黄启昭, 陶大军, 刘 骥

(哈尔滨理工大学 大型电机电气与传热技术国家地方联合工程研究中心, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:**为将频域介电谱测试技术应用于大型电机定子线棒绝缘老化状态的无损检测中,在热、电、机械等多因子联合作用下对定子线棒环氧云母绝缘进行加速老化试验,测试不同老化程度试样的频域介电谱。采用最小二乘法提取频域介电响应的 Davidson-Cole 模型参数作为特征参量,采用特征参量分析环氧云母绝缘的老化程度。最后通过拟合建立特征参量与老化时间的关系。结果表明:环氧云母绝缘的介质损耗因数  $\tan\delta$  随老化程度的增加而增大,尤其在频率为  $10^{-3}\sim 10^{-1}$  Hz 有明显的增大趋势;Davidson-Cole 模型提取的特征参量  $\beta$  和  $\tau$  可用于表征绝缘的老化程度, $\beta$  随老化时间的增加线性减小, $\tau$  随老化时间的增加呈指数函数减小, $\Delta\epsilon$  随老化时间的增加明显增大。通过  $\tau$  与老化时间的拟合关系,得出了定量表征绝缘老化程度的公式,可以考虑作为老化程度评估的经验公式。

**关键词:**大型电机;频域介电谱;环氧云母绝缘;Davidson-Cole 模型

中图分类号:TM215 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)07-0053-06

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.07.008

## Study on Ageing Characteristics of Epoxy-mica Insulation for Generator Bar

GE Baojun, HUANG Qizhao, TAO Dajun, LIU Ji

(National Engineering Research Center of Large Electric Machines and Heat Transfer Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

**Abstract:** In order to apply the frequency domain spectroscopy test technology to nondestructively test of ageing state for large electric machine stator bar insulation, we conducted accelerated ageing tests on the epoxy-mica insulation of stator bar under the combined action of multiple factors such as heat, electricity, and machinery, and tested the frequency domain spectroscopy of samples with different ageing degrees. The Davidson-Cole model parameters of frequency domain dielectric response were extracted as characteristic parameters by least square method, and the ageing degree of epoxy-mica insulation was analyzed according to the parameters. Finally, the relationship between characteristic parameters and ageing time was established by fitting. The results show that the dielectric loss factor ( $\tan\delta$ ) of epoxy-mica insulation increases with the increase of ageing degree, especially at the frequency of  $10^{-3} - 10^{-1}$  Hz; the characteristic parameters  $\beta$  and  $\tau$  extracted by the Davidson-Cole model can be used to characterize the ageing degree of insulation. With the increase of ageing time,  $\beta$  decreases linearly,  $\tau$  decreases exponentially, while  $\Delta\epsilon$  increases obviously. A formula for quantitatively characterizing the degree of insulation ageing is obtained through the fitting relationship between  $\tau$  and ageing time, which can be considered as an empirical formula for evaluating the ageing degree.

**Key words:** large electric machine; frequency domain spectroscopy; epoxy-mica insulation; Davidson-Cole model

收稿日期:2020-09-08 修回日期:2020-11-11

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51907042)

作者简介:戈宝军(1960-),男(汉族),黑龙江哈尔滨人,教授,研究方向为大型机电能量转换装置的基础理论与运行。

## 0 引言

定子线棒绝缘是大型电机的重要组成部分,其绝缘性能、机械强度很大程度上决定了电机的可用性和剩余寿命。在电机的运行过程中,线棒绝缘长

期受电、热、机械、环境等多种应力的联合老化作用,随着运行年限的增长,局部放电等引起电介质老化的因素影响加剧,绝缘性能逐渐劣化,绝缘问题也日渐突出,电机的使用寿命也将大幅缩短。据统计,因绝缘问题引发的大型电机故障占总故障的50%以上<sup>[1]</sup>。因此准确有效地评估大型电机定子线棒绝缘的老化状态具有极其重要的意义。

常规的电机定子线棒绝缘检测主要是对宏观电气参量的提取,这些参量分散性较大,不能提供完整的绝缘老化状态信息,而且易对绝缘造成不可逆的损伤,例如耐压试验。考虑到传统常规检测方法的不足,寻求一种非破坏性电气参数与绝缘剩余寿命的关系就显得尤为重要。20世纪90年代以来,无损诊断新方法的引入使得高压电气设备绝缘的状态评估取得了长足进步。介电响应法的测量方式有两种,分别为时域和频域,频域测量方式指的是频域介电谱法(frequency domain spectroscopy, FDS),时域测量方式又分为两种,一种是回复电压法(return voltage, RV),另一种是极化去极化电流法(polarization and depolarization current, PDC)。其中频域介电谱法(FDS)因具有抗干扰能力强、携带信息丰富等优点<sup>[2]</sup>而被应用于大型电机绝缘状态的评估研究中。

目前国内外使用频域介电谱法研究绝缘状态主要集中于变压器油纸绝缘,包括温度、水分、老化等因素影响下变压器油纸绝缘的频域介电响应特性。廖瑞金等<sup>[3]</sup>利用频域介电谱研究了老化和水分对油浸绝缘纸温度介电谱和活化能的影响。吴广宁等<sup>[4]</sup>使用频域介电响应法研究了有机酸对油纸绝缘热老化及频域介电谱(FDS)的影响。杨丽君等<sup>[5]</sup>通过引入修正 Cole-Cole 介电模型描述了变压器油纸绝缘频域介电谱随温度、水分、老化程度等因素的变化关系。在大型电机线棒绝缘方面,刘骥等<sup>[6]</sup>将频域介电测试用于环氧云母复合绝缘的固化过程研究。陈庆国等<sup>[7-8]</sup>使用温度归一化法分析环氧云母绝缘的介电响应特性,并基于 FDS 分析电机线棒环氧云母绝缘的电老化特性。文献[9-14]相继应用频域介电测试技术研究了环氧云母绝缘在温度、水分、老化时间等影响因素下的介电响应特性。虽然国内外专家学者对环氧云母绝缘的频域介电响应进行了研究,但大多集中于频域介电响应的定性分析,而对环氧云母绝缘特征量提取和分析研究的报道极少。

针对以上问题,本研究首先对定子线棒进行预处理,并对试样进行多周期、多因子联合老化试验。然后深入分析环氧云母绝缘的频域介电特性。最后,在此基础上采用 Davidson-Cole 介电模型提取环氧云母绝缘的频域介电测试的特征参量,并建立特征参量和老化时间的映射关系,验证该特征参量用于评估环氧云母绝缘状态的可行性。

## 1 Davidson-Cole 模型及其参数提取

### 1.1 介电响应模型分析

Debye 介电模型是对单一弛豫时间下介质复介电常数的描述<sup>[15]</sup>,介电弛豫模型在经典 Debye 模型基础上又发展出了扩展 Debye 模型,同时考虑到该经典模型的单一性和局限性,多位研究学者在 Debye 介电模型的基础上又提出了 Cole-Cole 介电模型、Davidson-Cole 介电模型、Havriliak-Negami 介电模型<sup>[16]</sup>等衍生模型。其中 Davidson-Cole 模型是在 Cole-Cole 模型基础上进一步提出的非对称形式模型,该模型对分析高分子体系的介电弛豫过程十分亲和<sup>[17]</sup>,因此本研究试验数据特征量提取采用 Davidson-Cole 非对称模型。

Davidson-Cole 介电模型方程如式(1)所示。

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

式(1)中: $\varepsilon_\infty$ 为光频介电常数; $\varepsilon_s$ 为静态介电常数; $\omega$ 为角频率; $\tau$ 为松弛时间; $\beta$ 表征松弛时间的分散程度,取决于介电谱的形状; $\varepsilon^*$ 为复介电常数; $j$ 是虚数单位。

将式(1)的复介电常数实部和虚部分离,可得式(2)和(3)。

$$\varepsilon'(\omega) = \varepsilon_\infty + \Delta\varepsilon \cos(\beta\theta)\cos^\beta\theta \quad (2)$$

$$\varepsilon''(\omega) = \Delta\varepsilon \sin(\beta\theta)\cos^\beta\theta \quad (3)$$

式(2)~(3)中,参数  $\Delta\varepsilon$  和  $\theta$  可以表示为式(4)~(5)。

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_s - \varepsilon_\infty \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1}(\omega\tau) \quad (5)$$

由以上公式可以看出,参数  $\beta$ 、 $\tau$  和  $\Delta\varepsilon$  会随着复介电常数实部和虚部的不同而改变,而不同老化时间下的频域介电谱也不同,为了建立强相关性,采用介质损耗因数来表征损耗,介质损耗因数如式(6)所示。

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''(\omega)}{\varepsilon'(\omega)} = \frac{\Delta\varepsilon \sin(\beta\theta)\cos^\beta\theta}{\varepsilon_\infty + \Delta\varepsilon \cos(\beta\theta)\cos^\beta\theta} \quad (6)$$

### 1.2 模型仿真及参数提取

对 Davidson-Cole 介电模型参数的提取可视为多参数非线性最优化问题,因此需要建立目标函数并做参数估计。FDS 测试过程中存在干扰,因此测得的  $\epsilon'$ 、 $\epsilon''$  数据或多或少有误差,但因  $\epsilon'$  的数量级比  $\epsilon''$  的数量级大,两者相应误差也存在较大差距,若此时依然选用最小二乘法进行数据处理,其优化结果必然会出现难以预料的偏差,因此选用加权最小二乘法建立目标函数来均衡整体精度,迭代搜索方向采用最速下降法的思想。一个好的启动初值对可靠收敛十分重要,参考文献[5],根据 FDS 测试数据做出的曲线选取参量初值。建立目标函数如式(7)所示。

$$f(\omega) = \sum_i l_i [\tan\delta - v]^2 \quad (7)$$

式(7)中: $l_i$ 为不同精度下的权重; $v$ 为频域介电测试获得的介质损耗因数数据, $\tan\delta$ 为理论模型拟合数据。

将式(6)代入式(7),得到式(8)。

$$f(\omega) = \sum_i l_i \left[ \frac{\Delta\epsilon \sin(\beta\theta) \cos^{\beta}\theta}{\epsilon_{\infty} + \Delta\epsilon \cos(\beta\theta) \cos^{\beta}\theta} - v \right]^2 \quad (8)$$

拟合过程如下:①为参数  $\beta$ 、 $\tau$  和  $\Delta\epsilon$  选择适当的初始值,并设置拟合误差  $\mu$  为  $10^{-4}$ ;②设置迭代次数  $k=0$ ;③根据式(8)计算  $\nabla f$ ,选择搜索方向为负梯度方向,即  $\Delta x^{(k)} = -\lambda \nabla f$ ,其中步长因子为  $\lambda$ ;④计算  $\nabla f(x^{(k)})$  的范数为  $\|\nabla f(x^{(k)})\|$ ,收敛判据为  $\|\nabla f(x^{(k)})\| \leq \mu$ ,若上式满足则输出结果,否则进行下一步;确定合适的步长因子  $\lambda^{(k)}$ ,原则是使得  $f(x^{(k)} + \Delta x^{(k)})$  尽可能小;⑥按照步骤③中的搜索方向使得目标函数下降,对  $x$  进行修正  $x^{(k+1)} = x^{(k)} + \Delta x^{(k)}$ ,即  $x^{(k+1)} = x^{(k)} - \lambda^{(k)} \nabla f^{(k)}$ ;⑦对越界变量适当加以限制;⑧以此计算下去直到满足收敛判据  $\|\nabla f(x^{(k)})\| \leq \mu$ ,输出结果。

拟合流程如图1所示,为方便描述,图中变量统一用  $x$  代替。

## 2 试验

### 2.1 试验线棒预处理

选用某电机厂生产的大型电机定子线棒制作成试样,其电压等级为 20 kV,线棒绝缘为 7 mm 厚的环氧-云母绝缘,对其进行如下预处理:①将线棒分割成 700 mm 小段;②对每段线棒试样端部去除绝缘层,露出内导体,裸露的导体长度为 10 mm;③裸露的线棒导体和测试导线焊接并引出,作为高压

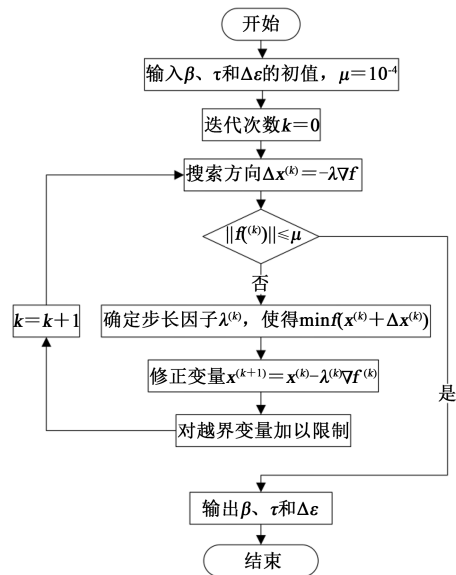


图1 拟合流程图

Fig.1 Fitting flow chart

电极正极,并打磨焊接处使其尽量光滑无毛刺;④将端部裸露的导体打磨成圆弧,同时在端部位置的绝缘表面涂抹按一定比例配置的 SiC 防晕漆,涂抹过程中尽量保持均匀。这样处理不仅能抑制电晕,而且能减小表面泄漏电流;⑤使用无水乙醇将线棒表面擦拭干净,为减小铝箔与线棒的接触电阻,需要在线棒中间位置涂抹低阻漆,并均匀涂抹凡士林,注意挤压,以免产生气泡,该极引出作为测试电极。线棒预处理效果如图2所示。

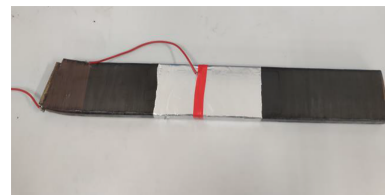


图2 预处理后的线棒

Fig.2 Stator bar after pretreatment

### 2.2 试验方案

老化温度和老化周期根据 JB/T 7589—2007《高压电机绝缘结构耐热性评定方法》进行选取,最终选定热老化温度为 210°C,单周期热老化时间为 120 h;参考 DL/T 596—2005、DL/T 492—2009 等试验标准,选定加速电老化试验参数为  $1.5U_N$  (30 kV),单周期电老化时间为 120 h;机械老化的振动方向垂直于试样,振频为 100 Hz,单周期机械老化时间为 12 h。试验选用 Megger Group Limited 公司生产的 IDAX-300 型介电响应分析仪进行测试,频率范围

为  $10^{-3} \sim 10^4$  Hz, 测试电压为峰值 140 V 的正弦电压。

试验过程如下: 首先将经过预处理的线棒试样置于烘箱中<sup>[18]</sup>, 恒温 100℃ 干燥 24 h, 以尽量消除受潮对试验的影响; 然后热老化 120 h, 电老化 120 h, 机械老化 12 h, 并以此作为一个老化周期, 每个周期共 252 h。

在每个周期老化结束后, 将线棒试样放入屏蔽盒内进行频域介电谱测试, 测试时保持温度为 25℃, 以尽量避免测试温度对结果产生的影响。测试原理如图 3 所示。

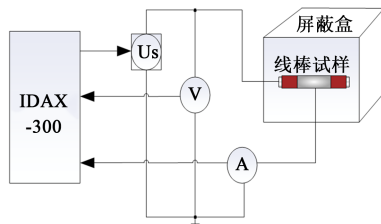


图3 频域介电谱测试原理图

Fig.3 Principle diagram of frequency domain dielectric spectrum test

### 2.3 试验流程

为初步了解线棒试样的绝缘情况, 参考 JB/T 7589—2007 对线棒进行耐压试验, 对地试验电压为  $2U_N$  (40 kV), 时间为 10 min。随施加电压逐渐升高, 线棒试样很快出现沿面闪络, 测温仪显示过热。观察线棒试样表面可见, 放电高能粒子碰撞绝缘产生了灼烧痕迹, 甚至有贯穿性通道, 高温下环氧胶碳化, 各组分粘结强度下降。为改善防晕性能, 参考文献[19]预处理线棒试样。

多周期、多因子老化试验, 老化因子包括电、热和机械振动, 每周期试验结束进行频域介电测试, 待完成 5 个周期的试验后得到频域介电响应测试数据, 绘制出介质损耗因数随频率变化的双对数坐标系下的曲线。选取适当的初值, 采用最小二乘法建立目标函数, 迭代搜索方向为负梯度方向, 选择合适的步长, 编程实现提取 Davidson-Cole 模型参数并以此作为特征参量, 通过观察特征参量的变化趋势, 拟合特征参量和老化时间的函数关系, 最后进行环氧云母介电响应特性分析和有关特征参量的分析, 试验流程如图 4 所示。

## 3 试验结果及分析

### 3.1 FDS 测试结果及分析

根据以上分析, 使用介电响应分析仪对线棒试样进行 FDS 测试, 得出复介电常数实部和虚部随频率变化的数据, 根据式(6)计算出介质损耗因数

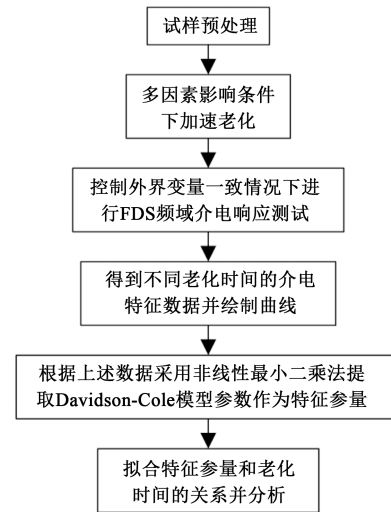


图4 试验流程图

Fig.4 Test flow chart

$\tan\delta$ , 并绘制出不同老化程度下介质损耗因数随频率变化的曲线, 如图 5 所示。

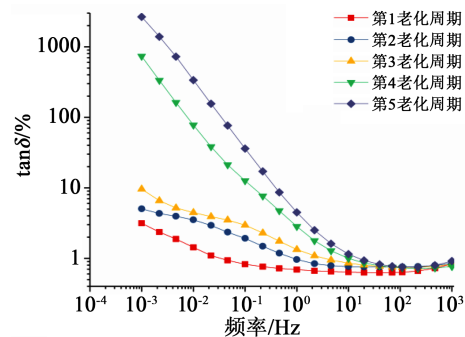


图5 不同老化时间试样的FDS曲线

Fig.5 FDS curves of samples with different ageing time

由图 5 可以看出, 随老化程度的增加,  $\tan\delta$  频域谱在整个测试范围内显著增大, 尤其是第 4、第 5 老化周期在  $10^{-3} \sim 10^{-1}$  Hz 内增加明显, 频率越低变化越明显。而在  $10^1 \sim 10^3$  Hz 内  $\tan\delta$  变化趋势却较为平缓, 即  $\tan\delta$  随老化程度变化也不明显。

定子线棒绝缘是以桐马酸酐环氧树脂胶黏剂粘合粉云母纸, 双面以电工无碱玻璃布补强, 浸以桐马环氧胶黏剂制成, 因此其主要组成材料为粉云母纸、无碱玻璃布和环氧胶黏剂。其中粉云母纸主要成分是云母, 而云母是一种无机化合物晶体, 为离子式结构, 在电场作用下会发生离子式位移极化, 但这种极化属于弹性位移极化, 几乎不引起损耗。无碱玻璃布由玻璃丝纤维制成, 与含碱金属氧化物相比损耗较小。环氧胶黏剂则由双酚 A 环氧树脂和桐马酸酐等树脂制成, 属于有机绝缘材料, 工频电压下 20℃ 时其介质损耗因数为 0.2~1.0。

从微观层面来说,在不同的频率下,环氧云母表现出的特性可以从其主要组分入手进行分析。首先云母材料会发生离子位移极化,而玻璃布不含弱离子和极性基团,介电常数低,在该材料中主要发生电子位移极化。环氧胶黏剂是有机介质,分子量大,分子间作用力很强。在外电场的作用下,介质中的正、负电荷发生位移,介质表面出现束缚电荷,该材料内部存在多种极化现象。因此环氧云母绝缘复合材料中存在多种极化,在频率很低时,各种极化均能建立,因此低频下材料介质损耗较大。随频率升高,偶极子极化逐渐跟不上电场变化,该类型的极化损耗降低。

从宏观层面来说,环氧云母绝缘属于复合绝缘材料,每种组分介电常数都不相同,而且属于多层电介质复合而成。因此环氧云母绝缘在电场作用下,其介质分界面必然产生空间电荷积聚,从而形成环氧云母绝缘复合材料的夹层极化,该极化现象在低频区( $10^{-3} \sim 10^1$  Hz)起主要作用,其弛豫时间由数秒到数十秒,甚至数十分钟不等,且能量损耗很大。随频率升高,电介质极化逐渐跟不上电场的变化而不能建立,因此夹层极化损耗也相应降低。

从整体层面来看,在低频区( $10^{-3} \sim 10^1$  Hz),电子位移极化、离子位移极化、转向极化、夹层极化均能建立,因此低频下介质损耗因数较大;随着电场频率的升高,夹层极化由于建立时间较长不能及时建立,相比外电场频率有明显滞后现象,介质损耗逐渐下降;频率进一步升高,偶极子转向极化逐渐不能建立,介质损耗进一步下降;在高频区( $10^2 \sim 10^4$  Hz),电子位移极化和离子位移极化均能建立,但是前者不产生能量损耗,后者几乎也不产生能量损耗,因此介质损耗基本不变。

随着老化周期不断增加,环氧云母绝缘的老化程度也在不断增大,绝缘内部降解成极性小分子基团的数目增多。在电场作用下,绝缘内部载流子数目急剧增加,绝缘内极化现象越发明显,复合介质界面处更容易聚集电荷,最终提高绝缘体系的导电率。同时环氧树脂的粘合力减小,复合绝缘中不可避免产生气隙,因此介质分界面随之增多,使得界面极化加剧,从而使得低频区( $10^{-3} \sim 10^1$  Hz)的同一频率下介质损耗随老化程度的增加而增大。老化程度的增加会导致定子线棒绝缘力学性能的下降,而工频介质损耗因数却不会产生较大的变化。

### 3.2 特征参量提取

通过对上述试验测得的频域介电谱数据,使用Davidson-Cole介电模型,采用非线性最小二乘法进行编程拟合,提取出模型特征参量 $\beta$ 、 $\tau$ 和 $\Delta\epsilon$ ,不同老

化程度下的频域特征参量如表1所示。从表1可以看出, $\beta$ 、 $\tau$ 整体随老化程度的加深而逐渐减小,而 $\Delta\epsilon$ 逐渐增大。

表1 不同老化周期的特征参量

Tab.1 Characteristic parameters of different ageing cycles

| 老化周期 | $\beta$ | $\Delta\epsilon$ | $\tau$   |
|------|---------|------------------|----------|
| 1    | 0.763   | 0.624            | 3 528.81 |
| 2    | 0.714   | 0.791            | 2 839.45 |
| 3    | 0.661   | 1.836            | 2 032.29 |
| 4    | 0.512   | 4.223            | 703.17   |
| 5    | 0.406   | 5.298            | 158.87   |

Davidson-Cole介电模型中的圆弧不对称度 $\beta$ 从物理意义上来说,反映的是介质内部松弛极化时间的分散程度<sup>[20]</sup>, $\beta$ 越大,圆弧越对称,分散程度越小, $\beta$ 的取值范围为0~1.0。由3.1的分析可知,随老化程度的增加,绝缘中将产生很多小分子基团,而这些小分子基团的松弛极化时间不同,因此从整体上看表现为松弛极化时间的分散程度增大,反映在圆弧不对称度上就是 $\beta$ 逐渐减小。

松弛极化时间 $\tau$ 代表松弛极化建立的时间。 $\tau$ 呈减小趋势,表明夹层极化弛豫向高频方向移动。环氧云母绝缘随老化程度的加深发生降解,分子间作用力被削弱,产生了更多小分子,使得介质的极性增大,界面极化将束缚更多的正、负离子,这对界面极化的建立极其有利,从而使得界面极化建立时间缩短,松弛极化时间 $\tau$ 缩短,极化损耗增大。

$\Delta\epsilon$ 呈增大趋势,表明夹层极化强度迅速增强,产生的损耗也相应增加。从式(4)可以看出 $\Delta\epsilon$ 代表材料的静介电常数 $\epsilon_s$ 与光频介电常数 $\epsilon_\infty$ 之差。光频介电常数是频率趋于无穷大时的介电常数值,因此可认为光频介电常数基本保持不变,所以 $\Delta\epsilon$ 的大小取决于静介电常数 $\epsilon_s$ 的值。随老化程度加深,介质内极性分子增多,因此静介电常数 $\epsilon_s$ 随老化程度加深不断增大,在同一频率下介质极化程度增大。表现在 $\Delta\epsilon$ 上就是随着老化程度的加深, $\Delta\epsilon$ 逐渐增大。

### 3.3 关于特征参量的分析

从表1可以看出,特征参量 $\tau$ 和 $\beta$ 随着老化时间的增加呈明显下降趋势,对 $\tau$ 和 $\beta$ 随老化时间的变化分别进行拟合。由于每个周期老化时间为252 h,因此5个老化周期的时间分别为252、504、756、1 008、1 260 h,二者的拟合结果如式(9)~(10)所示,前者拟合度为0.98,后者拟合度为0.97。

$$\tau = -2070.73 + 7350.07 \exp(-t/1094.97) \quad (9)$$

$$\beta = -3.6 \times 10^{-4} \times t + 0.886 \quad (10)$$

为了验证上式的可靠性,先取 $\tau$ 的极限值为0,表示绝缘已被击穿,则所得时间 $t$ 为1 387.12 h。当老化温度为210℃时,根据老化10℃规则,估算130℃的使用时间约为40.54年。 $\beta$ 随老化时间的增加呈线性减小。

综上,在工程实际中可以通过频域介电测试得到绝缘的频域介电谱,然后采用Davidson-Cole介电模型提取特征参量,进而通过特征参量和老化时间的关系推算绝缘的老化程度,从而为实现环氧云母绝缘的全面定量评估提供思路。

### 3.4 关于大电机定子线棒绝缘FDS测试的讨论

目前频域介电响应测试主要应用于变压器油纸绝缘的相关研究,经过国内外专家学者的多年研究,该技术的应用已经相当成熟,对变压器油纸绝缘的状态评估已经相当准确<sup>[1]</sup>。但是国内将频域介电响应测试应用在环氧云母绝缘状态评估领域的报道非常少。

大型电机绝缘的状态评估至关重要,通过测试环氧云母的频域介电响应特性,表明将频域介电响应测试应用在该领域完全可行,但是要建立更加全面的状态评估体系还有待进一步研究。建立频域介电响应测试在老化、受潮、温度等影响因素下的映射关系,并通过拟合对比实现状态评估;或者通过在大型电机的检测中加入频域介电响应测试项目,形成报表存入历史运行库;同时建立不同老化、受潮等状态下的特征量数据库,这样可以在大型电机运行检修时通过匹配特征量数据库和历史运行库来实现绝缘的状态评估,甚至可以通过在线检测,实时监控绝缘状态。

## 4 结论

(1)低频区( $10^{-3} \sim 10^{-1}$  Hz)环氧云母绝缘存在多种极化作用,随着频率的提高,夹层极化和偶极子极化逐渐跟不上电场的变化,介质损耗减小;高频区( $10^2 \sim 10^4$  Hz)环氧云母内存在电子位移极化和离子位移极化,前者没有能量损耗,后者几乎不损耗能量,因此介质损耗因数基本不变。

(2)老化程度的增加会导致定子线棒绝缘的力学性能下降,而工频介质损耗因数却不会产生较大的变化。

(3)特征参量 $\tau$ 与老化时间存在指数函数关系, $\beta$ 与老化时间存在线性关系。

(4)通过特征参量 $\tau$ 和老化时间的拟合关系,得出了定量表征绝缘老化程度的公式,可以考虑作为老化程度评估的经验公式。

## 参考文献:

- [1] BRUTSCH R, TARI M, FROHLICH K, et al. Insulation failure mechanisms of power generators[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2008,24(4):17.
- [2] 高波,郝长金,李帅兵,等.发电机环氧云母绝缘频域介电谱特性研究[J].西南交通大学学报,2017,52(1):9-15.
- [3] 廖瑞金,郭沛,周年荣,等.水分和老化对油浸绝缘纸温度介电谱和活化能的影响[J].高电压技术,2014,40(5):1407-1415.
- [4] 吴广宁,王晓剑,李先浪,等.有机酸对油纸绝缘热老化及频域介电谱特性的影响[J].高电压技术,2014,40(5):1424-1432.
- [5] 杨丽君,齐超亮,邓邦飞,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.
- [6] 刘骥,李秀婧,魏新芳.环氧-云母复合绝缘固化过程介电响应特性[J].电机与控制学报,2014,18(6):22-28.
- [7] 陈庆国,单志铎,付强,等.基于FDS的电机线棒环氧云母绝缘老化特性[J].复合材料学报,2017,34(9):1926-1933.
- [8] SHAN Z, CHEN Q, FU Q. Analysis of dielectric response of epoxy-mica insulation with temperature normalization[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2020,27(2):574-580.
- [9] 高波,郝长金,尹小兵,等.发电机主绝缘加速老化的频域介电特性[J].电机与控制学报,2019,23(3):57-64.
- [10] 高波,郝长金,尹小兵,等.温度对发电机主绝缘频域介电响应的影响研究[J].中国电机工程学报,2017,37(3):915-923.
- [11] 张征平,郝长金,涂小涛,等.大型汽轮发电机主绝缘的频域介电响应研究[J].大电机技术,2017(3):27-31.
- [12] 张征平,王兵,涂小涛,等.温度对汽轮发电机主绝缘频域介电谱特性的影响分析[J].绝缘材料,2016,49(4):55-60,68.
- [13] 王兵,高波,郝长金,等.温度和水分对大型发电机主绝缘FDS特性影响的试验研究[J].电网技术,2016,40(2):626-633.
- [14] 韩英喆,王安东,孙福春,等.定子线棒绝缘受潮对频域介电谱影响实验研究[J].绝缘材料,2020,53(10):103-107.
- [15] 张涛,李林多,冉华军,等.采用改进Davidson-Cole介电模型的变压器油纸绝缘状态分析[J].电力自动化设备,2019,39(1):192-197,204.
- [16] 王晓剑,何天磊,徐俊元,等.基于HN介电弛豫模型评估环氧云母绝缘的老化状态[J].绝缘材料,2019,52(8):41-46.
- [17] 刘骥,赵明云,张明泽,等.变压器油纸绝缘老化介电谱特性及特征量研究[J].电机与控制学报,2018,22(11):67-74.
- [18] 郝长金.基于介电响应法的发电机主绝缘状态评估技术研究[D].成都:西南交通大学,2017.
- [19] 王兵.汽轮发电机主绝缘多因子老化的介电响应特性研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [20] 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.